

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2015

Lukáš Richtár

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Analýza netradičních zdrojů energií pro napájení  
měřících jednotek

Analysis of Alternative Energy Sources for Power  
Supply of Measurement Units

2015

Lukáš Richtár

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Lukáš Richtár**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma:

Analyza použití netradičních zdrojů energií pro napájení  
měřicích jednotek  
Analysis of Alternative Energy Sources for Power Supply  
of Measurement Units

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše oblasti netradičních a obnovitelných zdrojů energie.
2. Analýza vhodnosti použití vybraných netradičních zdrojů energie pro napájení měřicích jednotek.
3. HW návrh a sestavení prototypu napájecího systému na základě zvoleného typu netradičního zdroje energie.
4. Experimentální ověření navrženého napájecího systému na vybrané měřicí jednotce.
5. Zhodnocení dosažených výsledků práce a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty, senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE. Internetový portál věnovaný oboru Alternativní zdroje energie. Dostupné z: <http://www.alternativni-zdroje.cz/>
- [3] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2004. 199 s. ISBN 80-7300-114-4.
- [4] CARR, Joseph J. *Elements of Electronic Instrumentation and Measurement*. 3rd ed. Upper Saddle River(USA): Prentice Hall, 1995. 594 s. ISBN 0-13-341686-0.
- [5] Peltierovy termobaterie. *HW.cz* [online]. © 1997-2014. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radovan Hájovský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6.5.2015

Podpis 

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, kterým byl Ing. Radovan Hájovský, Ph.D., za vhodnou metodickou a odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce a za zajištění podmínek pro měření.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou analýzy netradičních a obnovitelných zdrojů elektrické energie pro napájení měřicích jednotek. Mezi obnovitelné a netradiční zdroje energie lze zařadit biomasu, sluneční energii. Dalšími obnovitelnými zdroji elektrické energie jsou větrná a vodní energie, termoelektrické jevy, geotermální jevy nebo energie, kterou můžeme získávat například z vibrací lidského těla, a jiné. Pro aplikaci na důlních odvalech s probíhajícími termickými procesy jsou nejvhodnější termoelektrické jevy, které reprezentují termoelektrické generátory umožňující přímou výrobu elektrické energie díky rozdílu teplot. Další jejich výhodou je možnost ukrytí před veřejností z důvodu krádeží a vandalizmu.

Pro zjištění vlastností několika druhů termoelektrických generátorů byla provedena řada experimentů s využitím různých druhů zahřívání a chlazení. Výsledným experimentem je simulace reálných podmínek na důlních odvalech a měření jednotlivých teplot a napětí v čase. Pro ověření funkčnosti je navržen napájecí systém. Pokud je docíleno dostatečného rozdílu teplot na článku, systém je funkční a je možné jej použít.

## **Abstract**

This thesis deals with problems of an analysis of alternative and renewable energy sources of electric power for power supply of measurement units. Biomass and solar power belong between alternative and renewable energy sources. The other renewable sources of energy there are wind and water energy, thermoelectric phenomena, geothermal phenomena or the energy, which we can gain from vibration of human body etc. Thermoelectric phenomena are the best for their application on mine dumps with thermal processes, which are represented by thermoelectric generators allowing the direct production of electric energy due to temperature differences. The other of their advantage is possibility to hide before the public due to theft and vandalism.

A number of experiments were performed to analyse properties of several types of thermoelectric generators when using many kinds of heating and cooling. As a result of the experiment a simulation of real conditions on mine dumps and measurement of individual temperature and voltage in time were carried out. A power system is designed for verification of functionality. If the difference of temperature on module is sufficient, the system is functional and it can be used.

## **Klíčová slova**

Netradiční zdroje elektrické energie, termoelektrické jevy, Seebeckův jev, Peltierův jev, Peltierův článek

## **Key words**

Alternative Energy Sources of Electric Power, Thermoelectric Phenomena, Seebeck's Effect, Peltier's Effect, Peltier Module



## Seznam použitých symbolů a zkratek

P	Výkon	(W)
t	Teplota	(°C)
T	Termodynamická teplota	(°K)
U	Napětí	(V)
I	Proud	(A)
p	Tlak	(Pa)
$\alpha_{12}$	Seebeckův koeficient	(V·K <sup>-1</sup> )
$\pi_{12}$	Peltierův koeficient	(W·A <sup>-1</sup> )
Q	Teplo	(J)
$\mu$	Thomsonův koeficient	(K·M <sup>-1</sup> ·Pa <sup>-1</sup> )
$\Delta l$	Teplotní gradient	(m)
$\gamma$	Měrná elektrická vodivost	( $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ )
$\lambda$	Měrná tepelná vodivost	(m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
Z	ZT parametr	(K <sup>-1</sup> )
R	Odpor	( $\Omega$ )

## Obsah

Úvod .....	1
1 Teoretická část .....	2
1.1 Biomasa.....	2
1.2 Sluneční energie, fotovoltaika .....	3
1.2.1 Historie .....	3
1.2.2 Princip fotovoltaického článku .....	3
1.3 Větrné elektrárny .....	6
1.4 Vodní elektrárny .....	8
1.5 Geotermální jevy .....	9
1.5.1 Tepelná čerpadla.....	9
1.5.2 Metoda suchých par.....	9
1.5.3 Metoda mokrých par.....	10
1.5.4 HDR - Hot Dry Rock.....	10
1.6 Termoelektrické jevy.....	11
1.6.1 Samotné jevy .....	12
1.6.2 Peltierovy články .....	15
1.6.3 ZT parametr .....	16
1.6.4 Rozdělení článků podle použitelnosti .....	17
1.7 Zhodnocení řešení netradičních a obnovitelných zdrojů energie.....	19
2 Praktická část .....	20
2.1 Analýza Peltierových článků .....	21
2.1.1 DC/DC měnič .....	25
2.1.2 Regulator napětí.....	26
2.1.3 Experimentální ověření navrhovaného napájecího systému.....	27
2.1.4 Simulace skutečných podmínek.....	30
Závěr .....	40
Seznam použité literatury .....	41
Seznam obrázků .....	43
Seznam tabulek .....	44
Přílohy.....	45
Seznam příloh na CD .....	46



## Úvod

Cílem této bakalářské práce je analýza netradičních zdrojů energie pro napájení měřících jednotek. Téma obnovitelných a netradičních zdrojů energie je ve světě čím dál více aktuálnější. Alternativních a netradičních zdrojů energie je několik. Mezi ně lze zařadit biomasu, u které dochází ke spalování energeticky výhodných rostlin, sluneční energii, kde je možnost využití tepelné energie (například pro ohřev vody apod.) nebo využití slunečního záření k přímé přeměně na energii elektrickou, termoelektrické jevy, kde dochází k přímé přeměně tepla na elektrickou energii nebo například energii Země označovanou jako geotermální jevy a využívající pro výrobu elektrické energie a další.

V zadání práce je napsáno, že energie netradičních zdrojů elektrické energie je určena pro napájení měřících jednotek. Tyto jednotky umístěné v Moravskoslezském kraji na důlních odvalech jsou napájeny ze 12V baterie, kterou je potřeba dobíjet, a jelikož zde není nataženo elektrické vedení, zbývá vymyslet, jaký jiný zdroj elektrické energie použít. V úvahu je třeba brát také to, že zařízení určené pro výrobu elektrické energie bude umístěno v místech, kde není zákaz pohybu veřejnosti. Z těchto důvodů je nutné mít zařízení skryté.

# 1 Teoretická část

Teoretická část bakalářské práce se zabývá rešerší oblasti netradičních a obnovitelných zdrojů energie. Mezi netradiční a obnovitelné zdroje lze zařadit biomasu, sluneční, větrnou a vodní energii, geotermální jevy a také termoelektrické jevy.

## 1.1 Biomasa

*Biomasa neodmyslitelně patří mezi obnovitelné zdroje energie. Biomasu můžeme popsat jako přeměnu sluneční energii zachycenou rostlinami a uloženou ve formě chemické energie. Dalo by se říct, že v případě hospodárného využívání půdy bude biomasa k dispozici neustále. Její velkou předností je její minimální vliv na množství  $CO_2$  v ovzduší při jejím spalování. (1 str. 87)*

Pro vytváření energie biomasou se podle definice používá veškerá hmota biologického původu. Rozlišuje se mezi několika druhy. Dendromasa, což jsou různé dřeviny, fytomasa, biomasa rostlin a zemědělských plodin a také zoomasa, biomasa živočišného původu. Další dělení může být z hlediska energetického využití na zemědělskou (pěstování energetických rostlin, biomasa ze zahrad, travní porosty atd.), lesní (palivové dřevo, zbytky z lesní těžby apod.) a zbytkovou (vzniká při výrobě a zpracování primární rostlinné a živočišné biomasy). (2)

Biomasa obsahuje velké množství vody, proto je důležité před spalováním biomasu pořádně vysušit, jelikož množství vody má obrovský vliv na výhřevnost, a tudíž i na množství energie získané spalováním.

Pevné biopalivo není jediné využití biomasy, používá se také pro výrobu plyných biopaliv nebo kapalných biopaliv.

I když biomasa patří v České republice k nejvýznamnějším obnovitelným zdrojům, nebudeme se jí více zabývat, jelikož pro náš projekt, napájení měřících jednotek z nezávislých zdrojů energie, je nevhodná.

## 1.2 Sluneční energie, fotovoltaika

Energii získanou ze slunce můžeme pomocí fotovoltaických článků přeměnit na energii elektrickou bez použití mechanicky pohyblivých dílů. Fotovoltaické systémy se skládají z 5 základních částí. Fotovoltaický článek, který propojujeme do tzv. solárních panelů, fólií apod.; konstrukce pro upevnění panelů; měniče pro přeměnu střídavého proudu na stejnosměrný, jelikož střídavý proud se nedá uchovávat; zařízení pro uskladnění elektrické energie. Poslední částí je připojení do rozvodné sítě.

### 1.2.1 Historie

První člověk, který se zabýval fotoelektrickým jevem, byl od roku 1839 francouzský fyzik Becquerel. Jeho fotovoltaický článek se skládal z kovových elektrod, které byly ponořené v elektrolytu. I když byl Becquerel první, kdo se touto tematikou zabýval, první pevný článek vytvořený ze selenu v roce 1877 je připisován Adamsovi a Dyamu. Další článek s účinností 1% byl vyvinut o 6 let později v roce 1883 americkým fyzikem Charlesem Frittem, po kterém se také tento článek jmenuje – Frittsův článek. Velký rozvoj nastal při objasnění fotoelektrického jevu Albertem Einsteinem, za které dostal v roce 1921 Nobelovu cenu. Moderní články z křemíku bylo možné začít vyrábět až po významném objevu způsobu výroby čistého monokrystalu křemíku. O tento objev se zasloužil polský chemik Jan Czochralski. (1)

### 1.2.2 Princip fotovoltaického článku

Základním principem je fotoelektrický jev. Pro přeměnu energie fotonů na energii elektronů, které se pohybují, jsou zapotřebí dvě věci: volné elektrony a elektrický potenciál, který je uvede do pohybu směrem ze zdroje do spotřebiče. Foton svou energii dokáže předat elektronu. Pokud bychom ozařovali povrch kovu nebo polovodiče zářením, elektrony se začnou z povrchu daného materiálu uvolňovat. V případě dostatečného záření elektron "vyskočí" z kovu či polovodiče a zbude po něm tzv. díra. Zůstane-li uvolněný elektron v kovu, je velmi rychle vtažen do díry a energie se přemění v teplo. Principem fotovoltaického článku je tedy oddělit elektrony a díry a docílit projití volných elektronů elektrickým obvodem, kde vykonají práci před tím, než jsou vtaženy zpátky do díry. Lepší účinnosti se dosahuje právě v polovodičích než v kovech. K oddělení elektronů a děr (kladně a záporně nabitých částic) je zapotřebí vytvořit tzv. PN přechod.

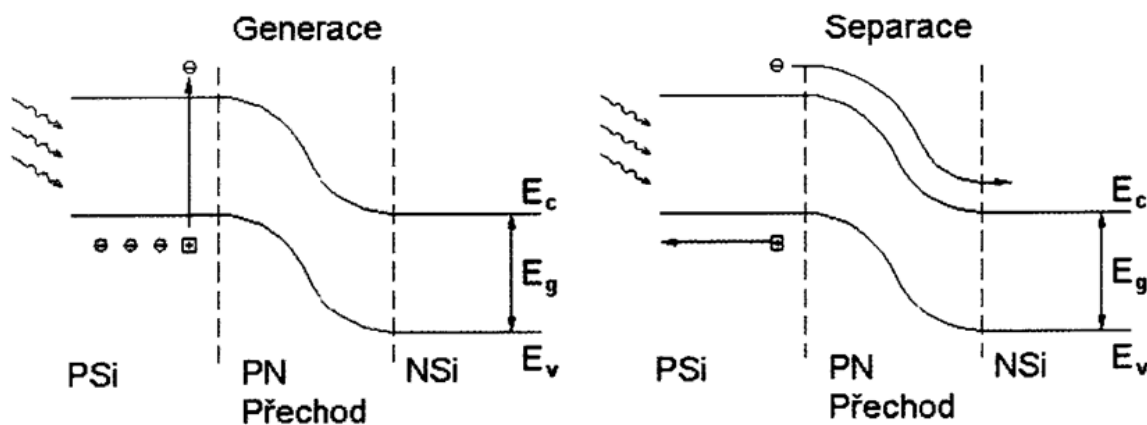
Podstatu PN přechodu lze nejlépe vysvětlit na atomu křemíku Si. Ten je zaplněn pouze z poloviny, jelikož má ve své valenční sféře pouze čtyři elektrony (ke stabilitě potřebuje získat ještě další čtyři valenční elektrony). V krystalu křemíku jsou jednotlivé atomy stabilní právě proto, že čtyři elektrony potřebné ke stabilitě sdílí s vedlejším atomem. K úplné stabilitě ovšem dochází jen při velmi nízkých teplotách a při vyšších začíná uvolňování několika elektronů (vazby zde nejsou tolik pevné jako například u atomů uhlíku). Díky této vlastnosti v malé míře je schopen vést elektrický proud. Pro použití ve fotovoltaickém panelu je potřeba křemík tzv. dopovat, což znamená přidání malého množství jiných prvků.

Pro dopování je možné použít prvek ze dvou skupin periodické soustavy prvků a to buď ze třetí anebo páté skupiny. Pokud dopujeme křemík prvkem z 3. skupiny (například borem), který má ve své valenční sféře pouze tři elektrony, místo čtyř, vzniká tak kladná částice, díra, která se následně může po krystalu pohybovat a šířit tak elektrický proud. Jelikož se jedná o kladnou částici, hovoříme o polovodiči typu P (positive). Pokud křemík dopujeme prvkem z 5. skupiny periodické soustavy prvků (například fosforem), který má elektronů ve valenční sféře pět. Tento atom nemá ve svém dosahu žádný další atom, se kterým by přebývajících pátý elektron mohl sdílet, proto se díky dodání jen malého množství energie může uvolnit a tak může vést elektrický proud. Jelikož přebývajících elektron je záporná částice, hovoříme o polovodiči typu N (negative).

Pokud dojde ke spojení polovodiče typu P a typu N, vznikne takzvaný PN přechod. Elektrony, které se volně pohybují, mají tendenci svou koncentraci vyrovnávat a přecházejí tak z polovodiče typu P na polovodič typu N a naopak. Elektrické pole ovšem přitahuje elektrony zpět a tím se pohyb elektronů ustálí a na rozhraní (PN přechodu) těchto dvou polovodičů vznikne gradient koncentrace elektronů. Důležitou vlastností PN přechodu je propustnost elektronů pouze v jednom směru, a to z polovodiče typu N do polovodiče typu P. Toto je základem diod, tranzistorů a také zmíněných fotovoltaických článků. (5)

*Nejjednodušší fotovoltaický článek můžeme tedy popsat jako velkoplošnou diodu s jedním PN přechodem. Aby mohla fotovoltaická přeměna probíhat, musí být splněny následující podmínky:*

- foton musí být pohlcen,
- foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu,
- vzniklá dvojice elektron (-) - díra (+) musí být separována, aby se znovu nespojila,
- oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči. (1 str. 63)



$P_{Si}$  - polovodičový křemík typu P,  $N_{Si}$  - polovodičový křemík typu N,  $E_C$  - energie vodivostního pásu,  $E_V$  - energie valenčního pásu

**Obr. 1: Základní princip funkce fotoelektrického jevu (1)**



**Obr. 2: Fotovoltaické panely (12)**

Výše popsaný druh získávání elektrické energie by pro mou aplikaci mohl být vhodný, ale z důvodu zvýšeného výskytu krádeží na Ostravsku jej nebude možné využít, zvláště na zmíněných důlních odvalech, kde by bylo velmi obtížné nainstalovat bezpečnostní prvky proti krádeži či vandalismu.

### 1.3 Větrné elektrárny

Energie větru lidstvo začalo využívat již před mnoha staletími. Zpočátku například k pohonu plachetnic, větrných čerpadel, větrných mlýnů a mnohých dalších zařízení. Ke konci 19. století se energie větru začala používat i k výrobě elektrické energie. Následně nato, se ovšem také rozvinula výroba elektrické energie například z uhlí či ropy a výroba pomocí větru začala upadat. Impulsem k využívání energie větru byla v 70. letech 20. století energetická krize. (2)

Moderní větrné turbíny mívají většinou 3 listy. Ideální stav je, když je rychlost rotace vrtule konstantní, avšak tohoto nelze zajistit vždy a rychlost se tedy mění. Maximální obvodová rychlost vrtule může být až 320 km/h. Tato rychlost odpovídá přibližně 22 otáčkám za minutu, nicméně standardní počet otáček se pohybuje mezi 10 otáčkami za minutu a touto maximální hodnotou. I když se vrtule mohou natáčet po směru větru, aby tak využily maximální energii větru a snížily tak riziko poškození, má každá turbína určitou maximální hodnotu rychlosti větru, kterou je schopna vydržet (současné větrné elektrárny: od 144 km/h do 259 km/h). (3 str. 75)

Pro vysokou efektivitu větrných elektráren je potřeba je umisťovat na vhodná místa – místa s pravidelnými a dlouhodobě vanoucími větry. Taková místa často bývají na pobřeží (Středozevní či severní oblasti Evropy) nebo někde v horských oblastech. Možná je i výstavba větrných elektráren přímo na moři, kde jsou ideální podmínky. (3 str. 75)

Výhodou tohoto způsobu výroby elektrické energie je, že je možnost stavět elektrárny různých rozměrů. Elektrárny malých rozměrů je možné používat v zemědělské oblasti, například pouze pro svícení a v případě bezvětří mít k dispozici jiný záložní zdroj. (3 str. 75)

**Tab. 1: Orientační hodnoty množství energie vyrobené malou větrnou elektrárnou v podmínkách České republiky (4 str. 48)**

Nominální výkon elektrárny (kW)	Roční produkce energie (kWh)
8	15000 - 22000
10	17000 - 35000
50	120000 - 250000



**Obr. 3: Větrné elektrárny (13)**

Využití energie větru by bylo také možné pro mou aplikaci, avšak ze stejného důvodu, jako u fotovoltaických panelů, je potřeba zvážit i jiný způsob získání energie.

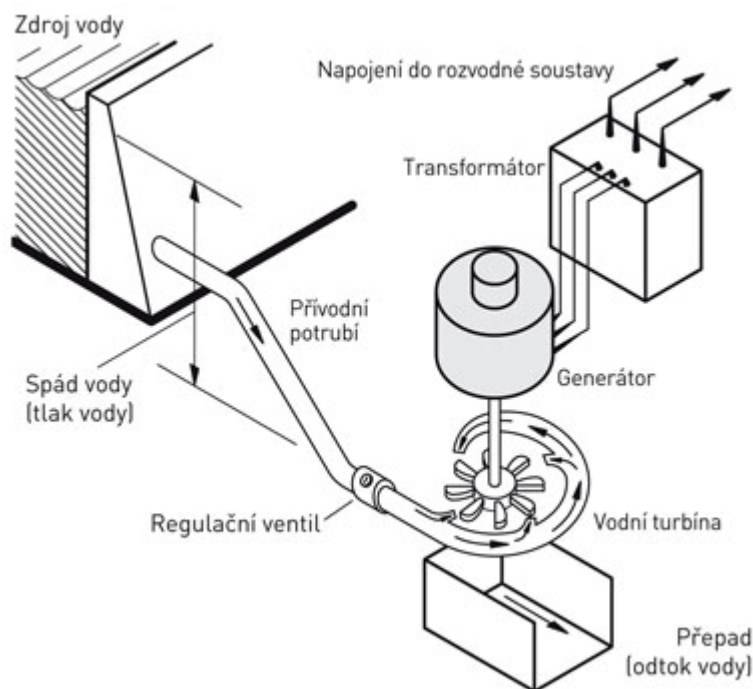


## 1.4 Vodní elektrárny

*Využívání vodních toků patří odedávna k základním způsobům získávání energie. Hydroenergetický potenciál je přírodním bohatstvím téměř každé země. Nicméně jeho využití na výrobu elektrické energie ve vodních elektrárnách a malých vodních elektrárnách je rozdílné. Určí její přírodní podmínky a stupeň hospodářského, technického a společenského rozvoje příslušné země.*  
(2 str. 140)

Vodní elektrárny využívají přeměnu potenciální energie na elektřinu. Velké vodní elektrárny mohou dosahovat velmi vysokého instalovaného výkonu (např. elektrárna Tři soutěsky v Číně má instalovaný výkon 22,5 GW). Zvláštním typem vodních elektráren jsou přečerpávací elektrárny. Největší přečerpávací elektrárnou v České republice jsou Dlouhé stráně. Jedná se o elektrárnu s instalovaným výkonem 650 MW. Její výhodou je možnost uchování energie. Při dostatku elektrické energie v síti se voda ze spodní nádrže přečerpá do nádrže horní a při nedostatku elektrické energie se spustí zpátky dolů a vodní elektrárna začne vyrábět elektrický proud.

Jelikož je ale tento způsob výroby elektrické energie nevhodný pro mou práci, jelikož na důlních odvalech nejsou žádné vodní toky nebo vodní nádrže, nebudeme se jím dále zabývat.



**Obr. 4: Princip vodní elektrárny (14)**

## 1.5 Geotermální jevy

Jako geotermální energii lze považovat energii uvolňující se ze země. Nejde jen o energii ze zemského jádra, ale také z významné části i ze zdrojů, mezi které zahrnujeme pohyb litosférických desek, jaderné pochody uvnitř planety a další. Plošná hustota energie je velice malá, tudíž použití této energie ze zemské kůry je velice omezené. Teplo z jádra se do zemské kůry přenáší vedením a prouděním. Gradient teploty se zvyšuje směrem k zemskému jádru o 20°C - 30°C na 1km hloubky.

Systémy pro získávání geotermální energie můžeme rozdělit na systémy založené na využití nízkopotenciální energie (tepelná čerpadla), systémy založené na využití vysokopotenciální energie (metoda suchých par, metoda mokrých par) a HDR- Hot Dry Rock. (1)

### 1.5.1 Tepelná čerpadla

Tepelné čerpadlo funguje tak, že ze zdroje odebírá teplo varem a odpařováním chladiva, kdy jeho páry jsou odčerpávány kompresorem do chladiče, kde okolí předají své teplo. Odevzdané teplo má vyšší teplotní potenciál než teplo odebírané ze zdroje.

Tepelná čerpadla lze rozdělit podle druhu zdroje tepla a podle média, kterému je teplo předáváno pro vytápění do tří základních typů:

- země – voda
- voda – voda
- vzduch – voda

Pokud je tepelné čerpadlo jako zdroj tepla, může pracovat ve dvou základních systémech zapojení (monovalentní a bivalentní). Jestliže je tepelné čerpadlo jediný zdroj tepla v daném objektu, hovoříme o monovalentním systému. Naopak bivalentní systémy spolupracují ještě s jinými zdroji tepla. (1)

### 1.5.2 Metoda suchých par

Jedná se o přímé získávání par z hlubin země. Tato metoda pro získání páry ovšem není příliš rozšířená a na některých místech, kde byla využita, je již zdroj tepla vyčerpán. Pozdějším výzkumem se zjistilo, že při přebytku tepla je dobré vodu zavádět zpátky do vrtů a tím dosáhnout větší účinnosti celého cyklu.

Jedním z dalších problémů zmíněné metody jsou plyny obsažené ve vodních parách, které snižují účinnost turbíny. Mezi takové plyny patří například  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  a jiné. Tyto plyny lze separovat pomocí dvou metod (separace před injektorem do turbíny a separace až za turbínou v oblasti kondenzace). (1)

### 1.5.3 Metoda mokrých par

Metoda mokrých par funguje na principu získávání vody ze země, která má díky většímu tlaku teplotu přes 100°C (ideálně alespoň 160°C). Po vyčerpání vody na povrch a dosažení normálního tlaku se voda začíná rychle vypařovat a energie této páry je převáděna na energii mechanickou a následně na energii elektrickou. Účinnost těchto elektráren je od 12% do 25%.

Systém pro takovéto získávání elektrické energie můžeme rozdělit na dva používané systémy (jednoduchý "flash" systém a zdokonalený "double flash" systém). Rozdíl mezi těmito systémy je ten, že u zdokonaleného "double flash" systému po prvotním využití páry se pára o nižších parametrech neodvádí zpět do vrtu, ale před tím je ještě vedena na turbínu a znova využita. (1)

### 1.5.4 HDR - Hot Dry Rock

Méně využívaná metoda založena na dvou předpokladech:

- s větší hloubkou je pravděpodobnost vyšší teploty > vyšší energie,
- v místě použití je dostatečně silná hornina, která není propustná.

Vrty pro získávání geotermální energie tímto způsobem bývají nejčastěji hluboké 5-6km, kde je teplota cca 180°C - 220°C s tlakem 165 MPa.

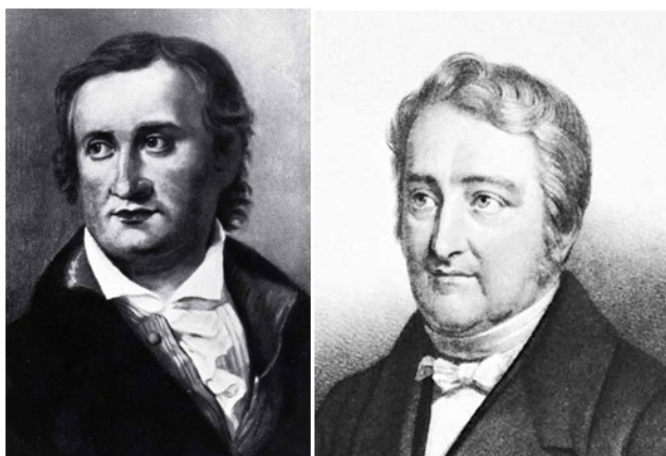
Metoda HDR není zcela výhodná hlavně kvůli možnému úniku vody z vrtů puklinkami, které vytváří. To může mít za následek drobná zemětřesení, která se občas projevují i na zemském povrchu. (1)

Vzhledem k nákladnosti a složitosti získání elektrické energie z geotermální energie a vzhledem k potřebě napájení pouze měřících jednotek, které nedosahují vysokých výkonů, není tento alternativní zdroj energie příliš vhodný pro mou aplikaci.

## 1.6 Termoelektrické jevy

Při teplotním rozdílu  $\Delta T$  na dvou kovových vodičích z různých materiálů vzniká při styku napětí  $\Delta U$ . Tento jev objevil německý fyzik Thomas Johann Seebeck v roce 1821. O 13 let později objevil francouzský fyzik Jean Charles Peltier jev, při kterém se při průchodu stejnosměrného proudu v místě, kde jsou spojeny dva různé vodiče, uvolňuje nebo pohlcuje teplo. Zda se teplo uvolňuje či pohlcuje a v jakém množství závisí na proudu, který obvodem prochází. Seebeckův i Peltierův jev jsou vzájemně inverzní. Tuto závislost potvrdil skotský fyzik William Thomson, který byl známý i jako lord Kelvin. Čtvrtým termoelektrickým jevem byl Benedicksův jev. *Tento jev říká, existuje-li ve vodiči teplotní gradient, přestože teploty obou konců vodiče jsou stejné, vznikne mezi konci vodiče rozdíl potenciálů.*(8)

Všechny tyto jevy se souhrnně nazývají termoelektrické jevy. Můžeme je rozdělit do dvou skupin, podle toho, zda generují termoelektrické napětí – k takovým jevům patří například Seebeckův jev a Benedicksův jev – nebo podle toho, zda po přivedení termoelektrického napětí je pohlcováno nebo uvolňováno teplo. Mezi tyto jevy patří například Peltierův jev a Thomsonův jev. (8)



**Obr. 5: Thomas Johann Seebeck (vlevo) a Jean Charles Peltier (vpravo) (8)**

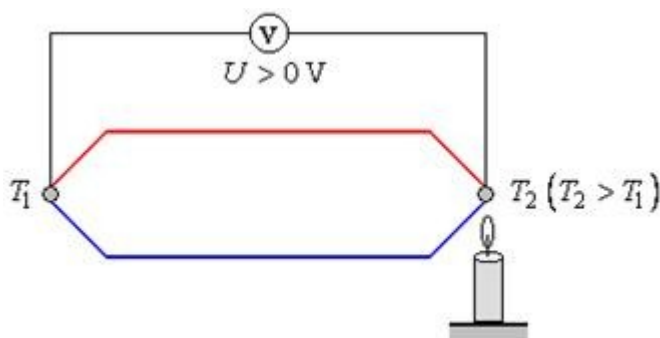
Po určité době se touto problematikou začal zabývat německý fyzik Edmund Altenkirch. Od roku 1909 se zajímal o termoelektrické generátory (TEG), kdy už se mu docela přesně povedla vypočítat jejich účinnost. O rok později, v roce 1910, zkoumal také termoelektrické chladiče (TEC), u kterých odhalil, že dříve používané materiály jsou zcela nevhodné. Zjistil, že daleko vhodnějšími materiály jsou polovodiče a to jak pro termoelektrické chladiče, tak pro termoelektrické generátory.

Komerční využití je známo přibližně od padesátých let 20. století, kdy se používala převážně ve vojenské a kosmické technice pro generování elektrického proudu a chlazení a také pro přesnou regulaci teploty. Teprve v posledních letech se články využívající tohoto jevu (Peltierovy články) začaly používat v civilních oborech. (6)

## 1.6.1 Samotné jevy

### 1.6.1.1 Seebeckův jev

Pokud spojíme dva kovy, které jsou z rozdílných materiálů, ve dvou místech, můžeme na těchto dvou spojích naměřit určité napětí, které závisí na rozdílu teplot spojů. Obvodem tak prochází elektrický proud a nastává tzv. Seebeckův jev.



Obr. 6: Seebeckův jev (7)

Napětí naměřenému na dvou rozhraních se říká termoelektrické napětí  $\Delta U$  a lze jej vypočítat ze vztahu:

$$\Delta U = U_{12}(T_1) - U_{12}(T_2) \quad (\text{V}) \quad (1.1)$$

U obou napětí, ze kterých se výsledné termoelektrické napětí počítá, je sice stejný index, rozdíl ale závisí pouze na velikosti jednotlivých teplot  $T_1$  a  $T_2$ .

Velikost termoelektrického napětí lze vypočítat i bez znalosti jednotlivých napětí. Stačí znát rozdíl teplot  $\Delta T$  a tzv. relativní Seebeckův koeficient  $\alpha_{12}$ , který je dán vždy pro určitou dvojici kovů (někdy též nazývaný termoelektrický koeficient).

$$\Delta U = \alpha_{12} \Delta T \quad (\text{V}) \quad (1.2)$$

Velikost Seebeckova koeficientu  $\alpha_{12}$  se pohybuje řádově od  $10^{-3} \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$  (polovodiče) do  $10^{-6} \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$  (kovy).

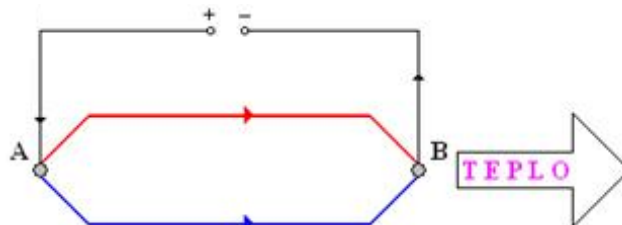
Termoelektrický koeficient je možné sledovat i na samotném vodiči (absolutní Seebeckův koeficient). Seebeckův koeficient může být buďto záporný nebo kladný. O kladném koeficientu hovoříme, prochází-li vzniklý proud vodičem od teplejšího konce ke studenějšímu. Pokud chceme dosáhnout co největšího relativního koeficientu, je třeba kombinovat kovy, kde jeden má co největší kladný absolutní Seebeckův koeficient a druhý kov co největší záporný Seebeckův koeficient. Výsledný relativní koeficient lze vypočítat podle následujícího vztahu:

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (\text{V} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (1.3)$$

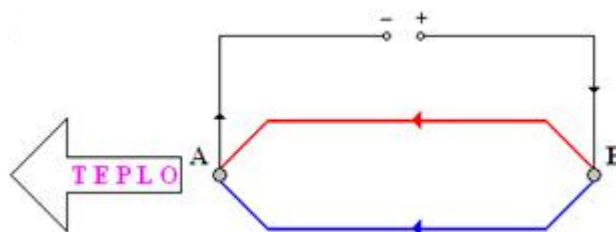
(7)(9)

### 1.6.1.2 Peltierův jev

Opačný jev k Seebeckovu jevu. Pokud připojíme takovýto termočlánek k vnějšímu zdroji stejnosměrného napětí a zajistíme, že teplota obou konců článku bude stejná, nastane Peltierův jev. Tzn. obvodem započne procházet elektrický proud a díky rozdílným materiálům nastane rozdíl teplot  $\Delta T$  na obou koncích.



Obr. 7: Peltierův jev- ohřívání- strana B (7)



Obr. 8: Peltierův jev- ohřívání- strana A (7)

Tak jako u Seebeckova jevu byl zaveden Seebeckův koeficient, tak je u Peltierova jevu zaveden Peltierův koeficient, který lze příležitostně vypočítat z poměru absorbovaného tepla a elektrického proudu.

$$\pi_{12} = \frac{Q}{I} \quad (\text{W} \cdot \text{A}^{-1}) \quad (1.4)$$

Peltierův koeficient  $\pi_{12}$  se nazývá relativní. Podobně jako u Seebeckova koeficientu existuje i absolutní Peltierův koeficient.

$$\pi_{12} = \pi_1 - \pi_2 \quad (\text{W} \cdot \text{A}^{-1}) \quad (1.5)$$

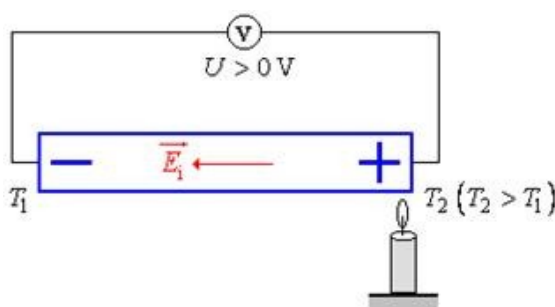
Pokud do vodiče vstupuje elektrický proud v místě teplejšího spoje a zároveň vystupuje v místě spoje studenějšího, můžeme koeficient  $\pi_{12}$  prohlásit za kladný.

(7)(9)

### 1.6.1.3 Thomsonův jev

Třetí termoelektrický jev byl potvrzený v roce 1851 Williamem Thomsonem. Tento jev říká, že pokud vezmeme kovovou tyč určité délky  $l$  a zahřejeme jeden její konec, vznikne v tyči tzv. teplotní spád (neboli teplotní gradient) a díky tomu se vytvoří mezi konci tyče určité termoelektrické napětí  $U$ .

Rozdíl oproti Seebeckova jevu je v tom, že v případě Thomsonova jevu používáme pouze tyč, kdežto u Seebeckova jevu dva vodiče z různých materiálů. Větší napětí je možné získat u Seebeckova jevu.



Obr. 9: Thomsonův jev (7)

Pokud prochází proud  $I$  tyčí o vnitřním odporu  $R$ , vzniká teplo, které je rovno:

$$Q = R \cdot I^2 - \mu \cdot I \cdot \frac{\Delta T}{\Delta l} \quad (\text{J}) \quad (1.6)$$

$\mu$  – Thomsonův koeficient

$\frac{\Delta T}{\Delta l}$  – teplotní gradient

První část vztahu se nazývá Joulovo teplo a druhé části vztahu se říká Thomsonovo teplo, kde jeho znaménko závisí na směru proudu, který protéká tyčí (vodičem).

(7)

### 1.6.1.4 Kelvinovy vztahy

Závislost mezi dříve zmíněnými jevy vyjadřují tzv. Kelvinovy vztahy. Jedním z těchto vztahů je porovnání Seebeckova a Peltierova koeficientu, který má tvar:

$$\alpha_{12} = \frac{\pi_{12}}{T} \quad (\text{V} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (1.7)$$



V praxi je u daného vodiče jednodušší zjistit Seebeckův koeficient, proto při potřebě znalosti Peltierova koeficientu není problém si jej dopočítat z výše zmíněného vztahu.

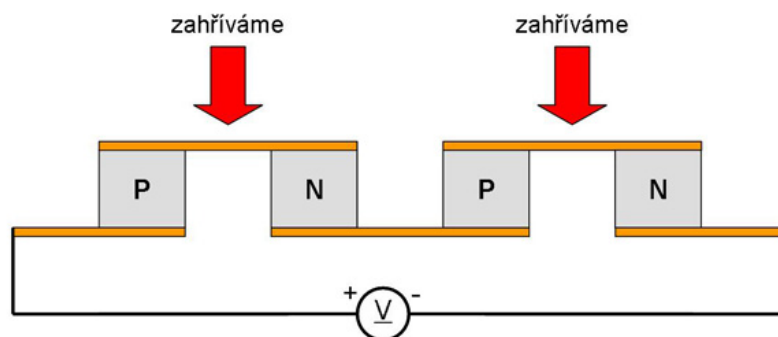
Druhým ze vztahů je vztah pro porovnání Seebeckova koeficientu a Thomsonova koeficientu. Vzhledem k tomu, že u Seebeckova jevu používáme 2 různé vodiče spojené ve dvou místech a v případě jevu Thomsonova pouze s jedním, musíme při výpočtu použít Thomsonovy koeficienty 2 kovů, které byly v daném případě použity.

$$\frac{d\alpha_{12}}{dT} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{T} \quad (-) \quad (1.8)$$

(9)

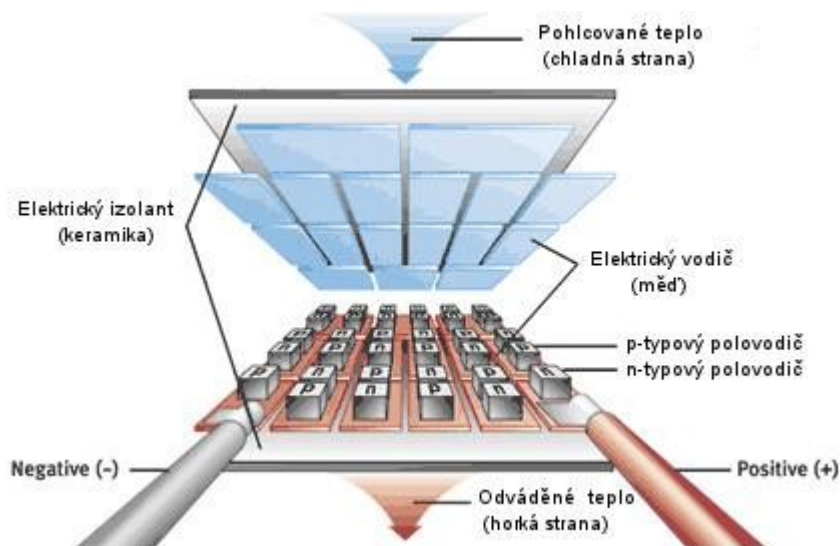
### 1.6.2 Peltierovy články

Peltierův článek se skládá ze tří částí. Polovodič typu P, polovodič typu N a spojovací můstek. Spojovacím můstkem jsou jednotlivé polovodiče spojeny a také je k nim přivedena elektrická energie (a absorbuje se jím teplo z Peltierova článku).



**Obr. 10: Ukázka složení v Peltierově článku (10)**

Jednotlivé Peltierovy články je možné zapojovat do série (na Obr. 10 je možné vidět zapojení 2 článků). Peltierovy články, které se v praxi používají pro různé aplikace, se skládají z několika elementárních článků (viz Obr.11).



Obr. 11: Peltierův článek (9)

### 1.6.3 ZT parametr

Pomocí ZT parametru (nebo také Z parametru) je možné vypočítat účinnost, která bude při přeměně elektrické energie na energii tepelnou. Je třeba hledat pro tvorbu Peltierových článků takové materiály, které mají co největší účinnost. Důležité při volbě materiálu je vědět rozsah teplot, pro které bude daný článek použit, jelikož každý materiál má různou účinnost při různém rozsahu teplot. Z parametr je možné vypočítat následujícím způsobem:

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \gamma}{\lambda} \quad (\text{K}^{-1}) \quad 1.9$$

kde:

$\alpha$  je Seebeckův koeficient ( $\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ ),

$\gamma$  je měrná elektrická vodivost obou materiálů ( $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ),

$\lambda$  je měrná tepelná vodivost ( $\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Čím je Z parametr větší, tím větší je také účinnost daného článku. Ze vztahu 1.9 vyplývá, že je třeba hledat materiály s co největším Seebeckovým koeficient, měrnou elektrickou vodivostí a s co nejmenší měrnou tepelnou vodivostí. Nejvhodnějším materiálem jsou polovodiče díky růstu koncentrace nosičů náboje, a tudíž i jejich energie. *Na teplém konci polovodiče vzniká tlak elektronového plynu větší než na konci studeném. Dochází k rychlé difúzi elektronů ze zahříváného spoje směrem k chladnějšímu spoji a tím vznikají prostorové náboje, což je příčina vzniku napětí (8).*

#### 1.6.4 Rozdělení článků podle použitelnosti

Termočlánky využívající termoelektrických jevů můžeme rozdělit do 3 kategorií. Do první patří termočlánky, které jsou určené k měření teplot. Jako druhé a často používané články jsou termočlánky používané k chlazení (TEC). Pro nás nejdůležitější bude poslední kategorie, tzv. články určené ke generování elektrické energie (TEG).

##### 1.6.4.1 Termočlánky určené k měření teplot

Základ těchto článků je v Seebeckově jevu. Termočlánky jsou složeny ze dvou kovů zapojených do série (1. kov - spoj 1. a 2. kovu - 2. kov - spoj 2. a 1. kovu - 1. kov). Pokud nastane situace, že oba dva spoje mají různou teplotu, vzniká na těchto spojích různý elektrický potenciál, díky kterému vzniká elektrická energie.

(8)

**Tab. 2: Dělení termočlánků podle použitých kovů (8 str. 15)**

Označení termočlánku dle IEC 584	Kovy termočlánku	Maximální teplota (°C)
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700
Označení termočlánku dle DIN 43710	Kovy termočlánku	Maximální teplota (°C)
L	Fe-CuNi, Fe-ko	- 200 až 900
U	Cu-Ni, Cu-ko	- 200 až 600

Nejčastěji používané termočlánky v ČR jsou z obecných kovů "J" a "K" a z drahých kovů "S" a "B", čímž je pokryt rozsah teplot cca (-200 až 1700 °C), avšak s dalšími termočlánky je možné tento rozsah ještě rozšířit, např. s termočlánky na bázi wolframu a rhenia (WRh5-WRh20, W-WRh26, WRh5-WRh26, WRh3-WRh25) lze měřit až do cca 2300 °C. (8)

##### 1.6.4.2 Termočlánky určené k chlazení (TEC)

Termočlánky mohou fungovat i tak, že pokud dodáme potřebný proud, který bude články procházet, bude se jeden ze spojů termočlánku ohřívat a druhý chladit. Toto se využívá u malých zařízeních, kde není možné například kompresorové chlazení, z důvodu velikosti či například pozice atd. Další výhodou může být prakticky nulová hlučnost, které u kompresorových chladičů nelze dosáhnout.

Jedním příkladem využití takového chlazení může být chlazení v přenosných ledničkách používaných v automobilech.

#### **1.6.4.3 Termočlánky určené ke generování elektrické energie (TEG)**

Termoelektrické generátory jsou zařízení, které díky rozdílným teplotám generují elektrické napětí. Zařízení pro generování elektrické energie se může skládat buď z jediného Peltierova článku, nebo ze skupiny takovýchto článků. Zdrojem tepelné energie většinou bývá například teplo vzniklé spalováním, ať už fosilních paliv, či odpadů. Dalším zdrojem může být teplo z odpadních vod z chladících zařízení apod. V našem případě se budeme zabývat teplem vyzařovaným z ostravských hald.

*Termoelektrické systémy můžeme rozčlenit do skupin v závislosti na teplotách, při kterých budou přibližně provozovány:*

- *Vysokoteplotní systémy - pracující při teplotách 900 °C až 700°C*
- *Středněteplotní systémy - pracující při teplotách 700 °C až 200 °C*
- *Nízkoteplotní systémy - pracující při teplotách nižších než 200°C*

(9)

## **1.7 Zhodnocení řešení netradičních a obnovitelných zdrojů energie**

Pro podrobnější analýzu některého z vybraných netradičních zdrojů energie jsem zvolil termoelektrické jevy. Tento alternativní způsob získávání elektrické energie je pro mou aplikaci vhodný, jelikož se jedná o napájení měřících jednotek v místech bez přístupu elektrické energie, jako jsou například vybrané důlní odvaly na Ostravsku, na kterých probíhají termické procesy, tudíž je zde zdroj tepla pro Peltierovy články. Další výhodou aplikace těchto článků na ostravských důlních odvalech je dobré ukrytí z důvodu možných a velice pravděpodobných krádeží a vandalismu, které zde nejsou výjimkou. Jako zdroj tepla pro teplejší stranu je tedy možné použít teplo haldy a druhou stranu budeme chladit vzduchem.

## 2 Praktická část

Praktická část bakalářské práce se zabývá analýzou netradičního zdroje energie, zjišťováním, zda je zvolený netradiční zdroj energie vhodný pro napájení měřících jednotek. Druhou částí práce je HW návrh a sestavení prototypu napájecího systému na základě zvoleného typu netradičního zdroje a následné jeho experimentální ověření.

Existuje mnoho druhů Peltierových článků. Na českém trhu je ovšem možné sehnat pouze termoelektrické chladiče. Termoelektrické generátory nejsou v České republice k dostání. Je potřeba je objednat ze zahraničí s nemalými poplatky.

**Tab. 3: Ukázka několika dostupných článků a jejich parametry (9)**

Články 40x40mm	Svorkové napětí (V)	Proud naprázdno (A)	Seebeckův koeficient $\alpha$ (V·K <sup>-1</sup> )	Tepelná vodivost $\kappa$ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tepelný tok (W)	Cena (Kč)
TEG 241-200-1	11,2	1,1	0,104	0,7	3,1	200	92	909
TEG 199-150-2	8,86	3,6	0,082	1,56	8	150	214	1605
TEG 199-200-5	8,64	3,45	0,08	1,69	7,5	200	223	1724
TEG 199-200-6	8,85	2,31	0,082	1,13	5,12	200	151	1297
TEG 254-200-7	11,2	1,08	0,102	0,66	2,99	200	88	1192
TEG 127-200-9	5,6	1,2	0,052	0,34	1,67	200	45	956
TEG 199-200-11	8,74	1,86	0,081	0,9	4,06	200	119	1465
TEG 254-200-12	11,12	0,58	0,103	0,357	1,62	200	47	1311
TEG 287-200-14	12,09	0,91	0,112	0,518	2,76	200	72	1306
TEG 241-120-15	10,15	0,98	0,094	0,56	2,5	120	74	859
Nízkonákladové články	Svorkové napětí (V)	Proud naprázdno (A)	Seebeckův koeficient $\alpha$ (V·K <sup>-1</sup> )	Tepelná vodivost $\kappa$ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tepelný tok (W)	Cena (Kč)
TEG 127-150-21	5,29	0,93	0,049	0,35	1,23	150	44	313
TEG 071-150-22	2,8	1,12	0,026	0,35	1,57	150	46	313
TEG 071-200-22	3,45	1,21	0,032	0,23	1,04	150	33	246
TEG 127-150-23	5,5	1,72	0,052	0,56	1,79	150	69	452
TEG 127-200-24	5,29	3,33	0,049	1	4,4	200	132	477

Z několika ukázaných termoelektrických generátorů a jejich parametrů je patrné, že cena článků se odvíjí od jejich výkonů. Existují také články menších i větších rozměrů, články obdélníkového tvaru nebo dvojité články. Výjimkou také nejsou články, u kterých maximální teplota dosahuje 1000°C.

Na Fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB TU Ostrava, na Katedře kybernetiky a biomedicínského inženýrství, jsou dostupné čtyři články TEG, u kterých ovšem není znám jejich typ, tudíž ani parametry. Jeden takovýto článek má hodnotu přibližně \$25. Dalšími dostupnými články jsou TEC MCTE1-12715L-S a TEC-12710.

## 2.1 Analýza Peltierových článků

První částí analýzy zvoleného netradičního zdroje energie je zjištění výstupního napětí a proudů článků TEG, TEC-12710 a TEC MCTE1-12715L-S v závislosti na rozdílu teplot teplé a studené strany a porovnání tří vybraných druhů článků.

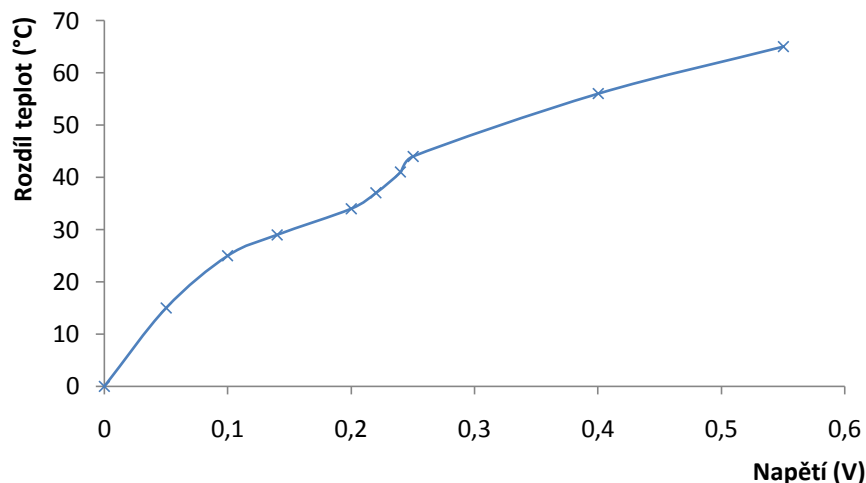
Jako první měření je měření, kdy teplá strana je zahřívána horkovzdušnou pistolí a strana chladnější chlazená pasivním chladičem procesu počítače. Oddělení obou stran je částečně zajištěno pomocí tenké dřevěné desky s otvorem ve tvaru Peltierova článku. Do tohoto otvoru se článek vloží a z obou stran se přiloží měděné destičky, které jsou mezi článkem a chladičem (resp. zahříváním plechem). Mezi měděné desky se na každou stranu dá čidlo pro měření teploty a následně se z jedné strany desky přišroubuje chladič a z opačné strany zahříváný plech. Pro měření teplot lze použít z mnoha druhů teplotních sond a čidel. V tomto případě je k dispozici teplotní sonda od firmy CEM Comporation získaná k multimetru UNI-T UT33C, která měří teplotu od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $1000^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 1\%$ . Další dostupnou sondou pro měření druhé strany je platinové teplotní čidlo PT100 s rozsahem teplot od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $500^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 0,2\%$ . Zatímco v prvním případě je teplota ihned zjištělná z displeje multimetru, v druhém případě je měřen proměnný odpor platinového čidla a z něj se určuje výsledná teplota pomocí převodní tabulky.

Počáteční teplota prvního experimentálního měření byla  $18^{\circ}\text{C}$ , což bylo naměřeno pomocí obou čidel pro měření teploty. Při tomto experimentálním pokusu bylo dosaženo maximálního napětí  $0,55\text{V}$  při rozdílu teplot  $65^{\circ}\text{C}$ . Závislost napětí na Peltierově článku na rozdílu teplot teplejší a chladnější strany roste téměř logaritmicky, až na rozmezí rozdílu teplot mezi  $30^{\circ}\text{C}$  až  $40^{\circ}\text{C}$ , kde je růst napětí mírnější než v průběhu zbývajících částí měření.

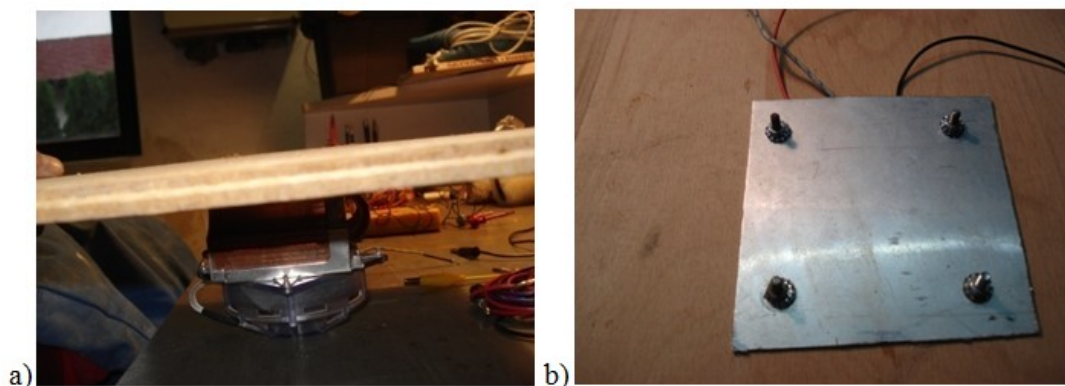
**Tab. 4: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 1. experimentálního měření**

Rozdíl teplot ( $^{\circ}\text{C}$ )	Napětí (V)
0	0
15	0,05
25	0,1
29	0,14
34	0,2
37	0,22
41	0,24
44	0,25
56	0,4
65	0,55





**Obr. 12: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 1. experimentálního měření**



**Obr. 13: Spodní strana s chladičem (obrázek a) a horní strana pro zahřívání (obrázek b)**

Problémem zjištěným prvním experimentálním měřením je chlazení, které je způsobeno šířkou článků, která je pouhé 4mm. Kvůli tomu dochází k velkému šíření tepla celým článkem. Další experimentální měření je proto zajištěno vodním chlazením.

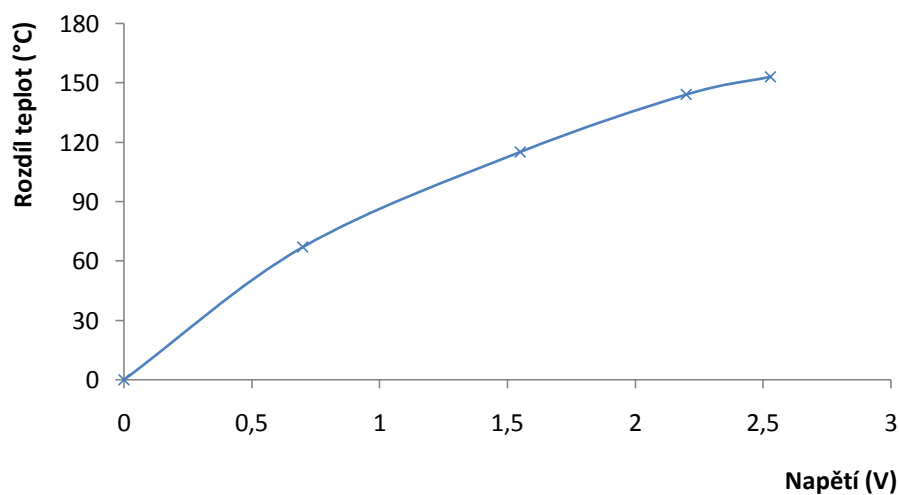
U druhého měření je chlazení vyřešeno pomocí železného čtverce o velikosti 50x50mm, na který je přivařena železná trubka, která je uprostřed zploštělá, aby se co největší plochou dotýkala železného čtverce. Tímto vyrobeným chladičem je vháněna voda z nádrže pomocí čerpadla a následně druhou stranou trubky opět vypouštěna do nádrže. Součástí vyrobeného chladiče je ve čtverci drážka, která slouží pro teplotní čidlo PT100 z důvodu měření studené strany článku. Druhou stranu článku překrývá hliníkový plech ve tvaru čtverce, ve kterém je vyrobena drážka pro druhé teplotní čidlo využívané v prvním experimentálním měření.

Počáteční teplota experimentu číslo 2 byla podle obou teplotních čidel 13°C. Při tomto měření bylo dosaženo podstatně větších rozdílů teplot, tudíž výstupní napětí bylo také větší. Při rozdílu cca

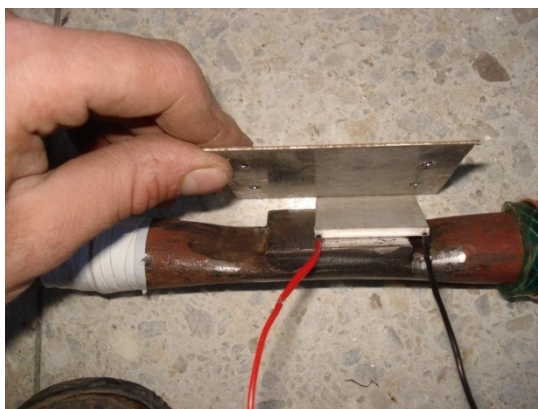
150°C bylo na článku napětí přibližně 2,5V. Z naměřeného průběhu 2. experimentálního měření si lze všimnout, že napětí v závislosti na rozdílu teplot roste logaritmicky, tak jako v prvním případě. Při měření proudu naprázdno napětí článku kleslo cca na 1,5V a ampérmetr naměřil 800mA.

**Tab. 5: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 2. experimentálního měření**

Rozdíl teplot (°C)	Napětí (V)
0	0
67	0,7
115	1,55
144	2,2
153	2,53



**Obr. 14: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 2. experimentálního měření**



**Obr. 15: 2. experimentální měření**

Stejným způsobem proběhlo ještě měření Peltierova článku TEC MCTE1-12715L-S, který je sice určen k chlazení, při němž má největší účinnost, nicméně s menší účinností funguje i jako termoelektrický generátor elektrické energie.

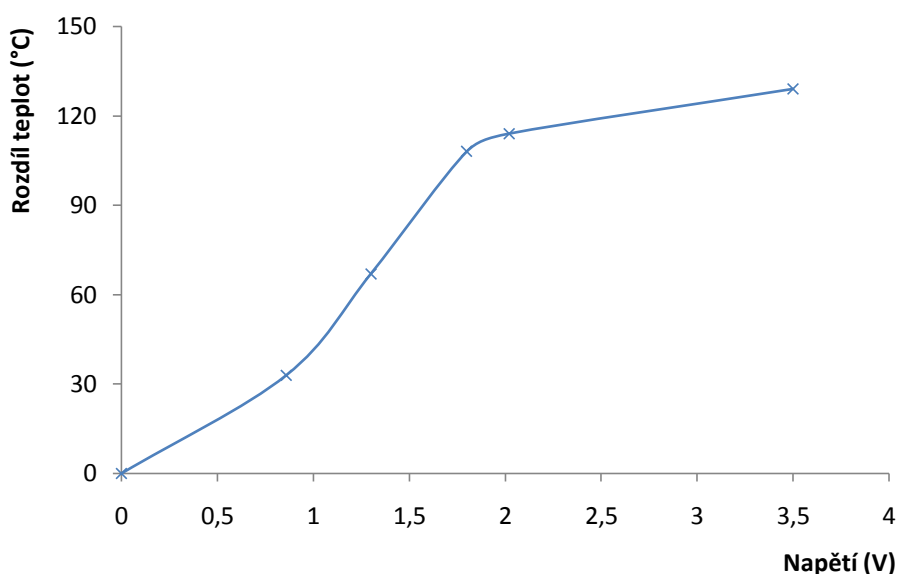
Na rozdíl od dříve měřených termoelektrických generátorů, které mají velikost 40x40x4mm, je velikost článku 50x50x4mm. Maximální dosažené napětí bylo 3,5V a při měření proudu naprázdno napětí kleslo na 1,8V při procházejícím proudu 1A.

Napětí těchto článků v závislosti na rozdílech teplot již nestoupá tak logaritmicky, jako v případě termoelektrických generátorů, spíše exponenciálně až do napětí 2V, kdy začíná napětí stoupat pozvolněji, téměř lineárně.

Vyšší dosažené napětí i proud u termoelektrických chladičů oproti termoelektrickým generátorům je příkládán větší velikosti článku.

**Tab. 6: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 3. experimentálního měření**

Rozdíl teplot (°C)	Napětí (V)
0	0
33	0,86
67	1,3
108	1,8
114	2,02
129	3,5



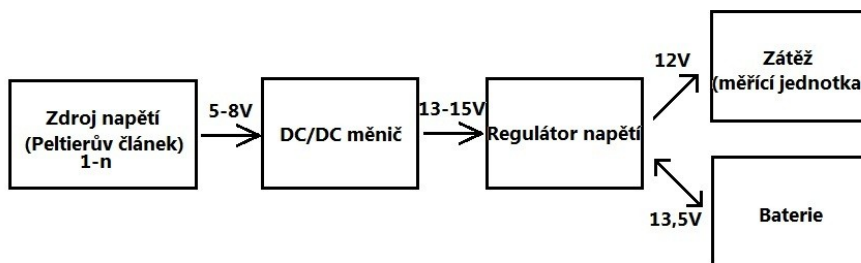
**Obr. 16: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 3. experimentálního měření**

Dalším testem pro analýzu Peltierových článků je obdoba 2. experimentálního měření s tím rozdílem, že plošky pro přenos tepla jsou uzpůsobené pro montáž 4 článků najednou. Důvodem tohoto experimentu je možnost zapojení více článků různými způsoby, ať už sériově, paralelně či různou kombinací.

Při montáži čtyř článků TEG a při teplotě studené strany  $25^{\circ}\text{C}$  a teplotě teplé strany  $55^{\circ}\text{C}$  napětí na jednom článku dosahovalo okolo  $700\text{mV}$ , což podle počtu dostupných článků je možné dosáhnout minimálně  $4\text{V}$  při sériovém zapojení. Toto napětí je dostačující, jelikož existují měniče, které dokážou zmíněné stejnosměrné napětí zvýšit až na  $15\text{V}$  stejnosměrných. Napětí  $15\text{V}$  už je možné buď stabilizovat na napětí vhodné pro dobíjení  $12\text{V}$  baterie nebo regulovat pro dobíjení baterie nebo napájení zátěže.

Při dosažení teplotního rozdílu  $60^{\circ}\text{C}$  vzrostlo napětí jednoho článku téměř na  $2\text{V}$ . Dosažené napětí je dostačující jako vstupní napětí DC/DC měniče při spojení 4 článků sériově.

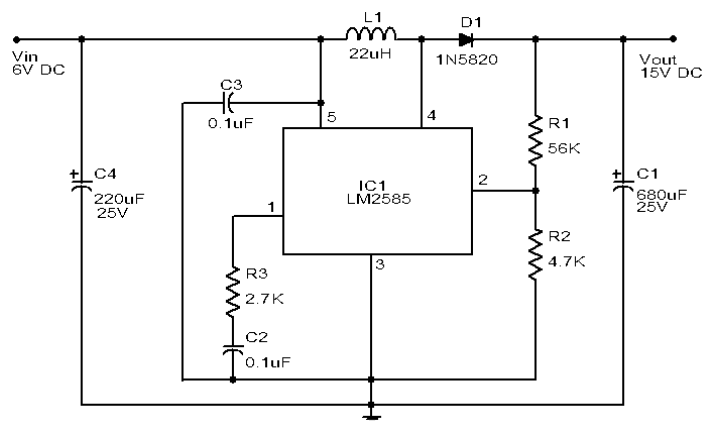
Pro napájení zátěže (měřicí jednotky) je třeba tedy napětí Peltierových článků upravit pomocí DC/DC měniče. Pro dobrou a efektivní funkčnost je zapotřebí použít regulátor napětí, který zajišťuje buď nabíjení baterie, nebo v případě dobíjení baterie napájení zátěže. Současně hlídá a indikuje stav baterie, aby bylo zabráněno přebíjení baterie či úplnému vybití.



**Obr. 17: Blokové schéma napájecího systému**

### 2.1.1 DC/DC měnič

Velice efektivní měnič, který zvyšuje stejnosměrné napětí  $6\text{V}$  na stejnosměrných  $15\text{V}$  s maximálním výstupním proudem  $3\text{A}$ . Schéma lze nalézt na internetových stránkách [www.circuitstoday.com](http://www.circuitstoday.com). Základem je integrovaný obvod LM2585 od firmy National Semiconductor. Tento obvod pracuje s  $76\%$  účinností.

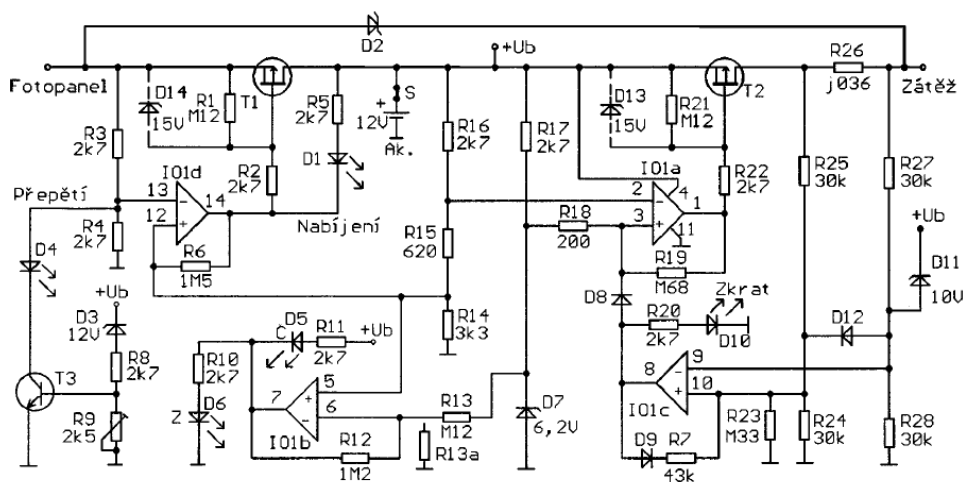


**Obr. 18: Schéma DC/DC měniče (15)**

DC/DC měnič je schopen zvýšit napětí na 15V stejnosměrných již při vstupním napětí 3,5V.

## 2.1.2 Regulátor napětí

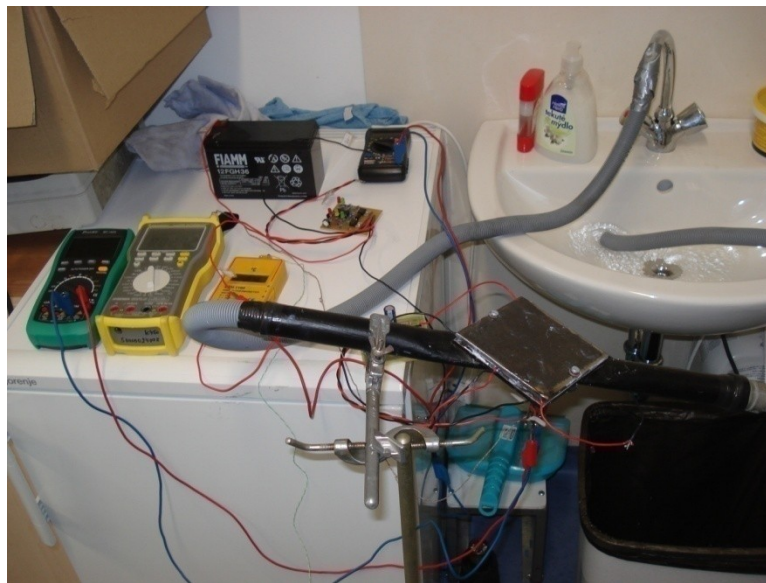
Regulátor je získaný z časopisu Amatérské rádio z března roku 2007 (řada B – pro konstruktéry). Regulátor je sice primárně určen pro solární panely, avšak pro aplikaci s Peltierovými články je naprosto dostačující a vhodný. Regulátor je zapojen mezi zdroj energie (Peltierovy články), baterii a zátěž. Regulátor je navržen tak, že při vzrůstu napětí na baterii nad 14,4V se nabíjení ukončí, aby se akumulátor zbytečně nepřebíjel. V takovém případě je z článků napájena pouze zátěž. V případě nedostatku napětí na článcích je zátěž napájena z baterie. Pokud dojde k poklesu napětí na baterii na 10,5V a hrozí nenávratné poškození baterie, napájení zátěže z baterie se ukončí. Velikost napětí na článcích i velikost napětí na baterii je indikováno orientačně pomocí LED diod.



**Obr. 19: Regulátor napětí (11)**

### 2.1.3 Experimentální ověření navrhovaného napájecího systému

Pro experimentální ověření navrhovaného napájecího systému je zvoleno sériové zapojení čtyř článků TEG, které jsou určeny ke generování elektrické energie.



Obr. 20: Experimentální ověření navrhovaného napájecího systému

Chladnější strana byla měřena pomocí termočlánku typu K dostupného k multimetru True RMS HHM 290, s kterým je možné měřit teplotu od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $1372^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 0,1\%$  (v rozsahu od  $-60^{\circ}\text{C}$  po  $1372^{\circ}\text{C}$ ). Teplejší strana byla měřena pomocí termočlánku typu K připojenému do digitálního teploměru GTH1160, který byl zapnut v režimu pro měření teplot v rozsahu od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $199,9^{\circ}\text{C}$  s přesností menší než 1%.

Při zahřívání (chlazení) se rozdíl teplot zvětšoval a napětí na článcích rostlo. Již při teplotním rozdílu  $40^{\circ}\text{C}$  DC/DC měnič zvýšil napětí na 16V, které takto vstupovalo do regulátoru napětí. Po měření napětí voltmetrem na svorkách připravených pro baterii bylo napětí 12,05V. Pro dobíjení 12V baterie je ovšem vhodné alespoň napětí 13,5V. Tento nežádoucí pokles napětí je způsoben nízkým výstupním proudem článků. Výkon článků je téměř spotřebován na funkci měniče a regulátoru, jelikož jejich provoz je možný díky napájení z článků bez použití externího zdroje napětí.

S tímto zapojením se objevil ještě jeden problém a to, že pokud teplota teplé strany stoupla nad hodnotu  $100^{\circ}\text{C}$ , napětí z 3,5V kleslo okamžitě téměř na 0V a drželo se v těchto nízkých hodnotách až do doby, než teplota klesla pod  $70^{\circ}\text{C}$ . Následně napětí opět vzrostlo přibližně na 1,5V (rozdíl teplot se zmenšil). Pokud se články otočily obráceně, opět generovaly elektrickou energii, avšak polarita byla obrácená (červený vodič byl záporný pól, černý vodič byl kladný pól). Při zahřívání (chlazení) napětí opět stouplalo, avšak pokud teplota studené strany stoupla nad  $80^{\circ}\text{C}$  (teplota teplé strany byla  $120^{\circ}\text{C}$  a kvůli malé šířce článku docházelo k velkému prostupu tepla přes článek), napětí kleslo opět téměř na 0V a opět vzrostlo po poklesu teploty studené strany pod  $60^{\circ}\text{C}$ .

Poznatek s měnící se polaritou podle otočení článku je důležitý kvůli zapojování článků do série (červený vodič jednoho článku se připojí na černý vodič druhého článku). Pokud by články nebyly otočeny stejně, nedošlo by k součtu napětí jednotlivých článků, ale k jejich rozdílu.

Problém s malým výstupním proudem článků je možné řešit paralelním spojováním článků, ať už článků TEG nebo TEC (TEC-12710). U takového paralelního spojení kvůli zvětšení proudu je důležité, ať napětí obou článků je totožné, čehož je těžké dosáhnout, jelikož každý článek je umístěn v jiné části přípravku. Pokud je napětí různé, začíná proud procházet mezi články (jeden se začne chovat jako zdroj, druhý jako spotřebič). V této situaci je možno dosáhnout vyššího proudu, než při použití jednoho článku, avšak tento proud bude menší, než je součet proudu obou článků.

Při sériovém zapojení se výstupní proud odvíjí podle nejmenšího proudu jednotlivých článků. Při montáži 4 článků na výše zmiňovaný přípravek se jednotlivé proudy výrazně nelišily.

Zajímavou myšlenkou je montáž několika článků na sebe z důvodu prostupu tepla. Články umístěné na chlazené straně mají svou druhou stranu zahřívanou díky přenosu tepla přes články umístěné na zahřívání straně, tudíž články na chlazené straně nemají takovou teplotu, aby jejich napětí kleslo téměř na 0V.



**Obr. 21: Demonstrace montáže dvou článků na sebe**

Takto umístěné články (chlazená strana – TEG, zahřívání strana – TEC-12710) byly zapojovány několika způsoby. Jako první byly vždy spojeny paralelně články na sobě ležící a vzniklé čtyři dvojice byly spojeny sériově. Jako druhé bylo paralelní zapojení vždy 2 článků stejného typu (TEC a TEG) a následné sériové spojení vzniklých dvojic. Dalším zapojením bylo spojení čtyř článků stejného typu paralelně a následné sériové spojení čtveřic.

Ani jedno ze zmíněných zapojení ovšem nedosahovalo potřebných hodnot z výše zmíněných důvodů, jelikož proudy ani napětí nikdy nebyly stejné, ale lišily se.

Výrazný rozdíl ovšem nastal po použití článků TEC MCTE1-12715L-S. Přípravek, použitý při předchozím experimentu, je vyroben tak, že na železný čtverec je přivařena na jeho úhlopříčku trubka, takže k největšímu ochlazování dochází právě v těchto místech. Články byly umístěny na tuhle úhlopříčku pro docílení požadovaného rozdílu teplot.



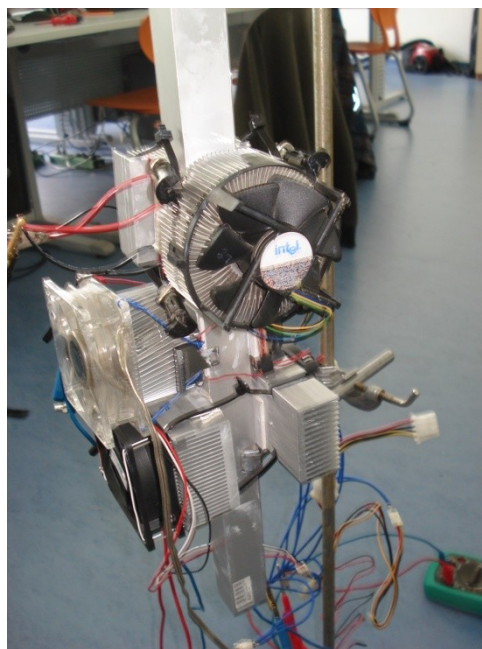
Požadovaného výstupního napětí 2 článků zapojených sériově bylo dosaženo při rozdílu teplot 50°C. Tento teplotní rozdíl je na důlních odvalech možný, jelikož teploty uvnitř odvalů dosahují i do 1500°C a pod povrchem bývá stále ještě i 80°C. Zkratový proud článků byl 1,6A. Po připojení DC/DC měniče a následně ještě regulátoru napětí byl na svorkách regulátoru pro připojení baterie stále zkratový proud přibližně 1A. Napětí na svorkách pro baterii stačilo k dobíjení baterie i po připojení zátěže v podobě 12V ventilátoru do počítače na svorky zátěže.

Tímto experimentem se lze přesvědčit, že pokud je docíleno rozdílu teplot 50°C, lze za použití článků TEC MCTE1-12715L-S dosáhnout požadovaného výkonu a tudíž je možné tento napájecí systém použít.

Ověření navrženého napájecího systému na vybrané měřicí jednotce proběhlo na komerčně dostupné telemetrické jednotce Fiedler-Magr M4016, která je autonomní a napájena z 12V akumulátoru o kapacitě 9Ah, který je potřeba dobít minimálním napětím 13,5V. Maximální napětí pro dobíjení tohoto akumulátoru je 15V a maximální nabíjecí proud je 2,25A.

Zmíněná telemetrická jednotka M4016 má stanovenou dobu provozu z akumulátoru bez externího dobíjení od jednoho týdne až po jeden rok. Záleží na počtu a typu připojených senzorů a také na způsobu provozu GSM komunikace.

Následujícím experimentem pro ověření použitelnosti článků bylo umístění článků na hliníkový profil. Z druhé strany k nim byl přimontován chladič pro chlazení procesorů do počítače s ventilátorem.



**Obr. 22: Ukázka experimentu bez vodního chlazení**

Při zahřívání horkovzdušnou pistolí a chlazení chladiče pomocí ventilátoru se rozdíl teplot rovnal 21,5°C (Teplota chladné strany – 20°C a teplota teplé strany – 41,5°C). Při takovémto rozdílu

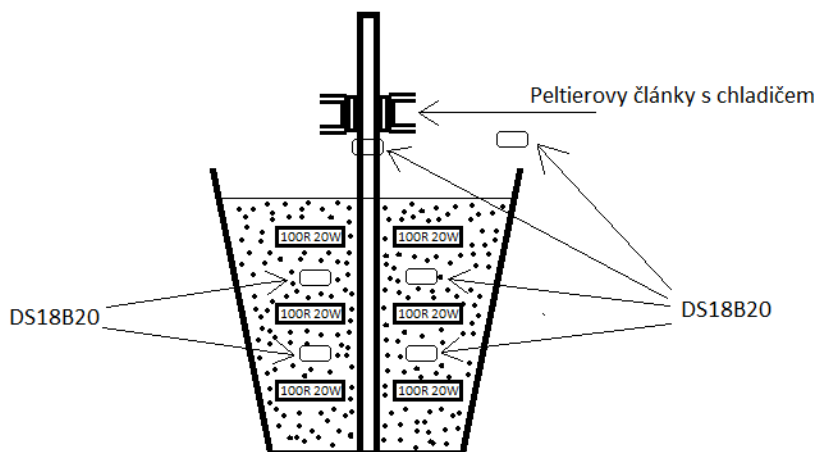
se na článku TEG vygenerovalo napětí o velikosti 1,76V. Problém takového experimentu je, že hliníkový profil je zahříván zespodu a nejvyššího napětí tedy dosahují pouze články umístěné nejnižše. Na člancích, které byly umístěny nejvýše, bylo vygenerováno napětí o velikosti pouze 300mV.

Při sériovém zapojení článků je ovšem možné dosáhnout požadovaného napětí alespoň 3,5V, které už DC/DC měnič zvýší na 15V. Problémem tohoto zapojení je opět proud, jako v předchozím případě, jelikož dostupné články TEG a články TEC-12710 nedosahují takových výkonů jako TEC MCTE1-12715L-S.

Problém s výstupním proudem je možné připsat kvalitě článků. Články TEG jsou sice určeny primárně na generování elektrické energie, zatímco články TEC MCTE1-12715L-S jsou primárně určeny k chlazení, avšak jejich cena byla téměř 900Kč za jeden, zatímco jeden článek TEG stál přibližně 400Kč v přepočtu z amerických dolarů, protože na českém trhu nelze články TEG koupit.

#### 2.1.4 Simulace skutečných podmínek

Simulace podmínek na haldách je prováděna pomocí plastového sudu naplněného štěrkem, který je zahříván výkonovými rezistory a do kterého je zasunut hliníkový profil. Na profil jsou přidělané Peltierovy články s chladičem.



Obr. 23: Nákres modelu pro simulaci podmínek na haldách

Výpočet proudu a napětí výkonových rezistorů:

$$R = 100\Omega$$

$$P = 20W$$

$$P = U \cdot I \quad (W)$$

2.1

$$U = R \cdot I \quad (\text{V}) \quad 2.2$$

$$P = R \cdot I^2 \Rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (\text{A}) \quad 2.3$$

$$I = 0,447 \text{ A}$$

$$U = 44,7 \text{ V}$$

Rezistory jsou zapojeny paralelně z důvodu dělení proudu (na rozdíl od dělení napětí u sériového zapojení). Rezistory jsou v sudu ve 3 vrstvách. V každé vrstvě jsou 4 rezistory (ze všech čtyř stran hliníkového profilu). Každá větev rezistorů je napájena samostatně s napětím  $U = 44,7 \text{ V}$  a proudem  $I = 1,78 \text{ A}$ .



**Obr. 24: Simulace reálných podmínek**

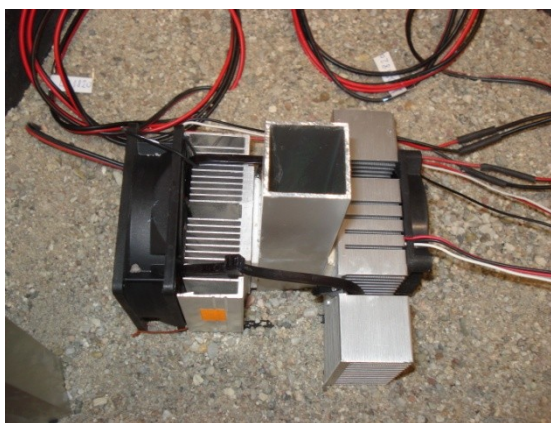
Při volbě rezistoru hrálo velkou roli také to, jaké rezistory bylo možné koupit v obchodech s elektronikou v Ostravě v dostatečném množství.

Pro chlazení článků jsou použity chladiče V7132, které jsou široké 50mm a vysoké 21mm. Při měření v simulovaných podmínkách bylo zjištěno, že tyto chladiče nejsou vhodné, jelikož nestíhají uchlazen články. Na článcích vznikl malý rozdíl teplot. Teplota zeminy byla téměř 60°C a teplota chladičů po pár hodinách měření byla menší jen o necelých 10°C. Generované napětí se pohybovalo na jednom článku do 100mV.



**Obr. 25: Umístění článků s chladiči na profilu zasazeném do šterku**

Dalším návrhem, jak vyřešit tento problém, je použití větších chladičů či případně použít chladiče s ventilátorem. Pro další měření tedy byly použity chladiče pro počítačové procesory. Na jeden článek byl použit chladič o velikosti 110x50x30mm, na kterém byl připevněn ventilátor o velikosti 50x50mm. Po instalaci chladiče napětí článku okamžitě vzrostlo na 300mV a stabilně si drželo tuto velikost. Na Peltierův článek, který byl namontován na protilehlou stěnu profilu, byl přidělán chladič o velikosti 80x80x30mm, u kterého docházelo ke stejnému problému, jako u použití menšího chladiče V7132. Po zapnutí ventilátoru o velikosti 80x80mm napětí na článku začalo stoupat až po 250mV, avšak poté nastal problém, že ventilátor začal ochlazovat i hliníkový profil, tudíž rozdíl teplot se opět začal snižovat a klesalo také napětí na prvním článku. Po vypnutí většího ventilátoru se rozdíl na prvním článku začal zvyšovat a tím pádem i napětí.



**Obr. 26: Chlazení ventilátory**

Lepších výsledků se docílilo, pokud se mezera mezi chladičem a šterkem vyplnila polystyrenem, jelikož chladič nebyl ohříván pouze přenosem tepla přes článek, nýbrž taky přímo ze země. Výsledek byl sice lepší, ale ne nijak výrazně. Napětí vzrostlo maximálně o 100mV.



**Obr. 27: Oddělení chladiče a šterku polystyrenem**

Lepších výsledků bylo docíleno ještě jiným způsobem. Na to bylo potřeba vyrobit speciální přípravek. Na železnou trubku s průměrem 20mm a dlouhou přibližně 300mm byl přivařen železný plíšek ve tvaru obdélníku s dírami v rozích (kvůli upevnění chladiče). Na železný plíšek se připevní Peltierův článek a na něj chladič. Mezi plíšek a článek a mezi článek a chladič se nanese tenká vrstva pasty pro dobrý přenos tepla. Následně se trubka zasadí do země až po chladič tak, aby plíšek byl co nejvíce v zemi, aby nedocházelo k ochlazování teplé strany vzduchem. Pro chlazení je opět použit chladič s ventilátorem.

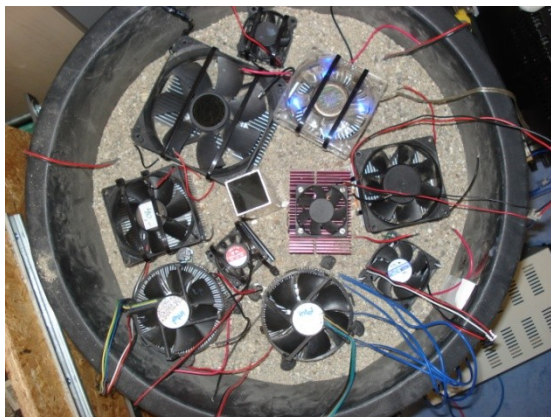


**Obr. 28: Přípravek určený pro zasazení do země**

Napětí získané tímto způsobem o pár milivoltů přesahovalo hranici 0,5V. Zmíněným způsobem by tedy šlo docílit výsledného napětí 3,5V po sériovém zapojení všech článků, avšak



nevýhodou je, že články umístěné blíž výkonových rezistorů dosahovaly podstatně vyššího napětí než články umístěné od rezistorů dál.



**Obr. 29: Aplikace přípravků určených pro zasazení do země**

Zajímavou myšlenkou při měření je také natočení chladiče, zda má proudit chladný vzduch směrem na chladič nebo zda má teplý vzduch chladiče odsávat a vyfukovat jej ven. Předpokládaný výsledek úvahy byl takový, že lepším způsobem je druhá z možností, avšak experimentálním pokusem bylo ověřeno, že chladič se lépe ochlazuje, když ventilátor vhání okolní vzduch na chladič a ten následně prochází přes žebra chladiče a odchází boky chladiče.

Jednou z dalších možností, jak vyřešit problém s malým napětím na člancích kvůli malému rozdílu teplot, je použití integrovaného obvodu BQ25504 společnosti Texas Instruments, který je vyvinut pro velice efektivní zvyšování napětí (nabíječka s vysokou účinností). Tyto obvody jsou navrženy právě pro řízení napětí velice slabých zdrojů energie, většinou právě zdrojů energie získaných z okolního prostředí, jako například termoelektrická energie, fotovoltaická energie (solární panely umístěné v prostředí při velmi malé hladině osvětlení), energie vibrací (například vibrace lidského těla) a jiné.

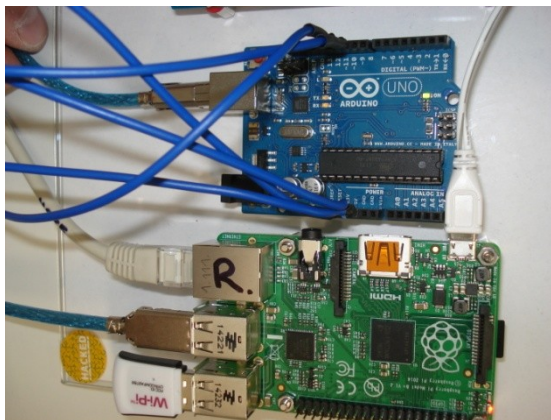
#### **2.1.4.1 Měření teplot pomocí DS18B20**

Teplota je měřena digitálními teplotními čidly DS18B20 od firmy Dallas, která měří s rozsahem teplot od  $-55^{\circ}\text{C}$  do  $125^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 0,5\%$ . Jedná se o digitální teploměr poskytující 9-12 bitový převodník. S DS18B20 lze měřit jedno-vodičově (tzv. 1-Wire). Jednou z možností, jak získávat měřenou teplotu, je připojení na měřicí kartu Arduino UNO.

Senzory jsou zapojeny do dvou větví. V každé větvi jsou 4 paralelně spojené senzory. Z každého senzoru jsou vyvedeny 2 vodiče. Jeden z DQ a druhý je společný pro Ground a  $V_{DD}$ . Společný vodič je připojen na Arduino UNO do zdířky pro GND. Vodiče DQ jsou zapojeny do dvou kanálů (vždy 4 senzory do jednoho). Na tuto svorku je přivedeno napájení 5V přes rezistor  $4,7\text{k}\Omega$  z

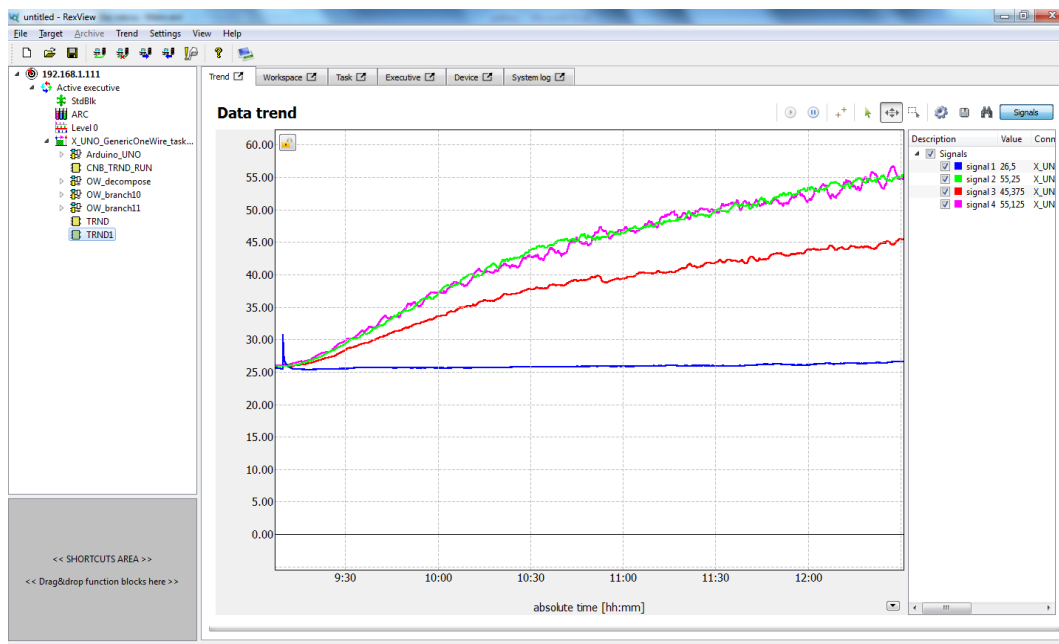
Arduina 5V. Propojení senzorů DS18B20 je možné díky adresám přiřazeným ke každému senzoru, tudíž je možné následně v počítači zjistit, který senzor je který.

Arduino Uno je přes USB připojeno na Raspberry PI Model B+, které je taky dobře dostupné. Raspberry PI je napájeno s externího zdroje napětí na rozdíl od Arduina, kde USB kabel slouží nejen pro přenos dat, ale také pro napájení. Přenos dat mezi Raspberry PI a počítačem je realizován pomocí Ethernetu.



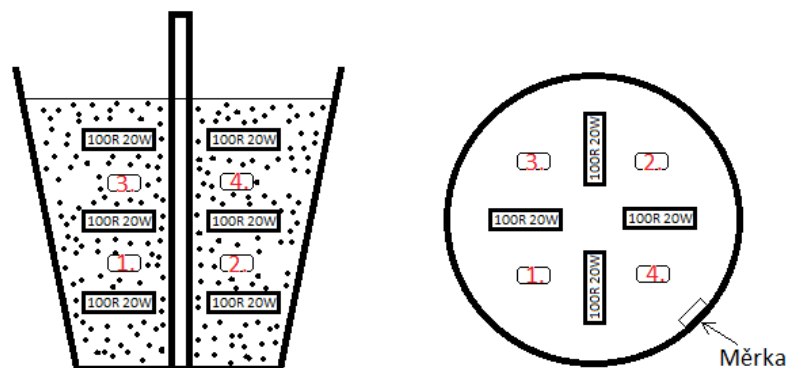
Obr. 30: Zapojení Arduina a Raspberry PI

Naprogramování je umožněno díky softwaru společnosti REX Controls. Konkrétně díky programům RexDraw, kde je možné senzor graficky naprogramovat a RexView, kde lze sledovat, co se děje v jádře řídicího systému REX při jeho běhu. K tomu slouží jednoduchá aplikace.



Obr. 31: Zobrazení v programu RexView

Program zjišťoval teplotu čidel s intervalem 500ms, tyto data vykresloval do grafu a následně je archivoval s intervalem 30 minut. Měření napětí na článcích TEG a TEC 12710 bylo prováděno manuálně s intervalem 10 minut. Měření probíhalo 3 hodiny.

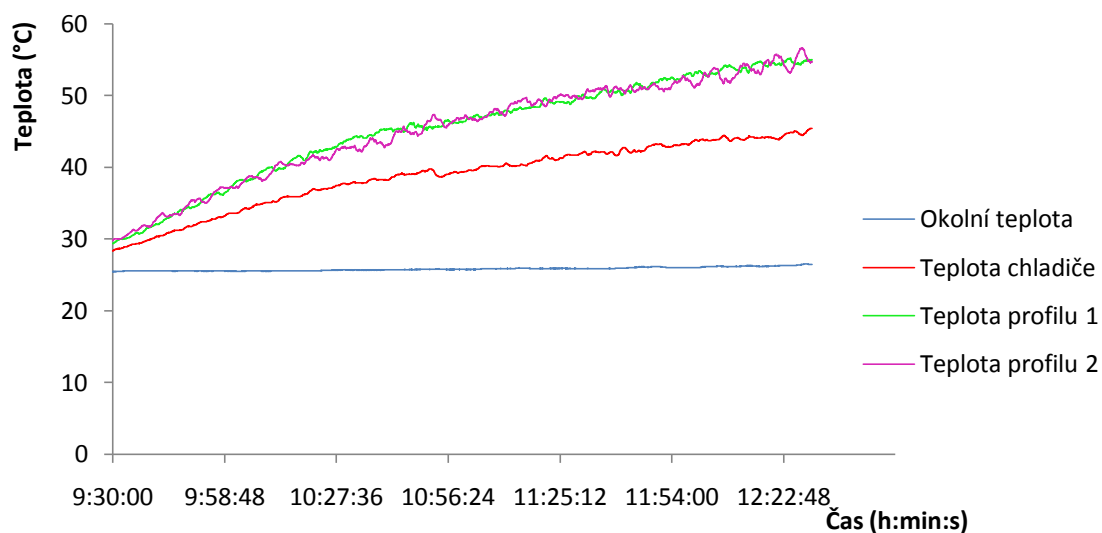


Obr. 32: Konkrétní umístění senzorů DS18B20

Tab. 7: Naměřené teploty mimo sud v závislosti na čase

Čas	Teplota okolí (°C)	Teplota chladiče (°C)	Teplota profilu 1 (°C)	Teplota profilu 2 (°C)
9:30:00	25,5	28,3125	29,375	29,8125
9:40:00	25,5625	30	31,75	31,9375
9:50:00	25,5625	31,75	34,3125	35,25
10:00:00	25,5625	33,5625	37,0625	37,125
10:10:00	25,5	35,125	40	38,75
10:20:00	25,625	36,3125	41,375	41
10:30:00	25,6875	37,6875	43,75	42,6875
10:40:00	25,75	38,25	45,1875	42,8125
10:50:00	25,8125	39,5625	45,4375	45,5
11:00:00	25,8125	39,3125	46,3125	46,875
11:10:00	25,875	40,1875	47,4375	47,6625
11:20:00	25,9375	40,975	48,5625	49,375
11:30:00	25,875	41,8125	49,9375	49,5
11:40:00	25,9375	41,6875	50,6875	50,9875
11:50:00	26,1875	43,25	51,9375	51,375
12:00:00	26,0625	43,875	53,3125	51,375
12:10:00	26,1875	44	53,7875	52,4375
12:20:00	26,25	44,125	54,5625	54,875
12:30:00	26,5	45,4375	55	54,75

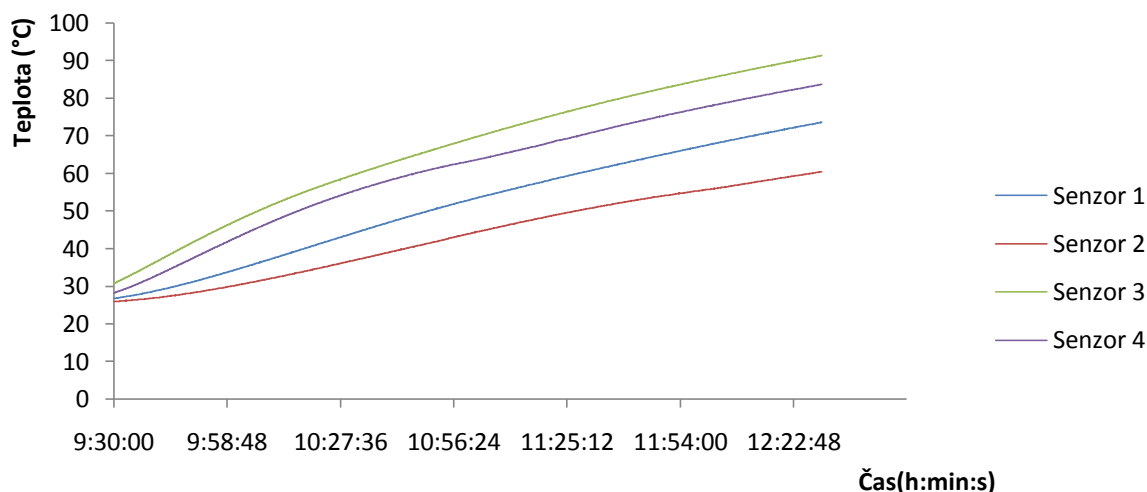




Obr. 33: Závislost teploty na čase

Tab. 8: Naměřené teploty v sudu v závislosti na čase

Čas	Teplota 1 (°C)	Teplota 2 (°C)	Teplota 3 (°C)	Teplota 4 (°C)
9:30:00	26,8125	25,9375	30,8125	28,25
9:40:00	28,625	26,8125	36,125	32,4375
9:50:00	31,1875	28,25	41,6875	37,4375
10:00:00	34,125	30	46,9375	42,4375
10:10:00	37,3125	32,125	51,5625	47,125
10:20:00	40,5625	34,3125	55,6875	51,3125
10:30:00	43,8125	36,6875	59,3125	54,9375
10:40:00	47,0625	39,0625	62,7125	58,125
10:50:00	50,0625	41,4375	66	60,875
11:00:00	52,875	43,9375	69,125	63,125
11:10:00	55,5625	46,25	72,125	65,4375
11:20:00	58,0625	48,5	75	67,9375
11:30:00	60,5	50,5625	77,75	70,5
11:40:00	62,875	52,5	80,3125	72,9375
11:50:00	65,1875	54,1875	82,75	75,3125
12:00:00	67,4375	55,625	85,0625	77,5625
12:10:00	69,5625	57,25	87,25	79,6875
12:20:00	71,6875	58,875	89,35	81,6875
12:30:00	73,6875	60,5	91,375	83,625

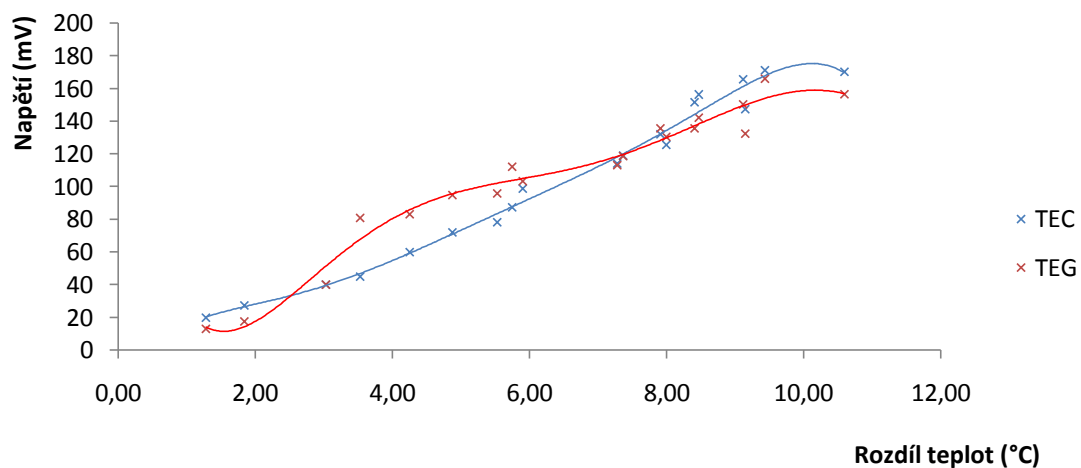


**Obr. 34: Závislost teploty na čase**

Ze zobrazených průběhů teplot senzorů ve šterku v závislosti na čase je patrné, že některé senzory byly k výkonovým rezistorům blíže a některé zase dále.

**Tab. 9: Tabulka pro zobrazení závislosti rozdílů teplot a napětí na člancích TEC 12710 a TEG**

Čas	Teplota profilu- průměrná (°C)	Rozdíl teplot (°C)	Napětí TEC (mV)	Napětí TEG (mV)
9:30:00	29,59	1,28	20	13
9:40:00	31,84	1,84	27,5	17,5
9:50:00	34,78	3,03	40,1	40
10:00:00	37,09	3,53	45	80,8
10:10:00	39,38	4,25	60	83,2
10:20:00	41,19	4,88	72,1	95
10:30:00	43,22	5,53	78,2	95,7
10:40:00	44,00	5,75	87,5	112,1
10:50:00	45,47	5,91	98,8	103,5
11:00:00	46,59	7,28	114,1	113,3
11:10:00	47,55	7,36	118,9	118,7
11:20:00	48,97	7,99	125,5	130,6
11:30:00	49,72	7,91	131,8	135,8
11:40:00	50,84	9,15	147,1	132,5
11:50:00	51,66	8,41	151,5	135,6
12:00:00	52,34	8,47	156,2	142,1
12:10:00	53,11	9,11	165,4	150,2
12:20:00	54,72	10,59	170	156,5
12:30:00	54,88	9,44	171	166



**Obr. 35: Závislost rozdílu teplot na napětí na článcích TEC 12710 a TEG**

Ze zobrazených průběhů napětí v závislosti na rozdílu teplot je patrné, že oba články patřící do nižší cenové kategorie (TEG a TEC 12710) mají velice podobné charakteristiky, i když jejich primární funkce je rozlišná. Dosažení nízkých hodnot napětí bylo způsobeno právě malým rozdílem teplot. Lepších výsledků by bylo možné dosáhnout například v zimě, pokud by okolní teplota namísto 25°C byla -20°C. V případě větru a tím pádem lepšího ochlazování chladiče by se napětí na článcích zvýšilo také.

## Závěr

Analýza obnovitelných a nezvyklých zdrojů energie pro napájení měřících jednotek ukázala, že nejvhodnějšími zdroji energie na vybraných důlních odvalech jsou právě termoelektrické generátory, jelikož díky termickým procesům je k dispozici nevyužívané teplo. Podstatným důvodem volby tohoto zdroje energie je možnost lepšího ukrytí před veřejností, aby nedocházelo k častým krádežím nebo vandalismu.

Základem praktické části práce bylo zjištění vlastností článků, které byly k dispozici. Jako článek dosahující nejvyšších výkonů byl předpokládán TEG, jelikož se jedná o termoelektrický generátor, který je přímo určen ke generování elektrické energie na rozdíl od termoelektrických chladičů. Už při prvním experimentálním měření, kdy chlazení bylo řešeno pomocí pasivního chladiče, byly výsledky v rozporu s předpokladem. Toto zjištění bylo taky ověřeno pro chlazení vodou.

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo s články TEC MCTE1-12715L-S. I když jsou tyto články určeny převážně k chlazení, fungují i jako generátory, avšak s menší účinností, než v případě chlazení. S ostatními dvěma druhy nebylo dosaženo takových výsledků, a ačkoli se jednalo o dva různé druhy článků (TEC-12710 a TEG), výsledky byly velice podobné. O článcích TEG je vzhledem k naměřeným výsledkům možné říct, že patří do kategorie nízkonákladových článků. Cena článků tedy odpovídala i jejich kvalitě, která je v případě TEC MCTE1-12715L-S více jak dvojnásobná oproti ostatním dvěma typům. Roli může také hrát velikost článků. Článek TEC MCTE1-12715L-S má rozměry 50x50x4 mm na rozdíl od zbylých dvou článků, které mají rozměry 40x40x4 mm.

Termoelektrický generátor, jako zdroj elektrické energie pro napájení měřících jednotek, je vhodný v případě dobrého rozdílu tepla a pod podmínkou, že rozdíl teplot je přenesen na plošky článků. Tento poznatek je velice důležitý, jelikož přenos tepla přes článek je velký kvůli malé šířce článku. Maximální naměřené napětí na článku TEC MCTE1-12715L-S dosahovalo až 3,5V při rozdílu teplot 129°C. Při zatížení článku napětí kleslo téměř na polovinu, avšak proud procházející článkem byl více než 1A. Při zapojení dvou takových článků do série je dosaženo dostatečného napětí, které už vybraný DC/DC měnič zvýší natolik, aby jím mohl být dobíjen 12V akumulátor. Na výstup měniče je ještě připojen regulátor napětí, který má za úkol hlídat stav akumulátoru a řídit, zda dobíjet akumulátor nebo jen napájet zátěž. V případě přebíjení akumulátoru je potřeba nabíjení ukončit a v případě vybití zabránit dalšímu odběru z akumulátoru, aby nedošlo k jeho nenávratnému poškození.

Funkčnost napájecího systému byla ověřena na telemetrické jednotce Fiedler-Magr M4016 napájené z 12V akumulátoru, který je v případě dostatečného rozdílu teplot dobíjen s rychlostí, která stačí pro nepřetržitý provoz přístroje.

V případě simulace reálných podmínek nebylo dosaženo tak ideálních výsledků, jako při laboratorních podmínkách, avšak v případě použití většího chladiče je možno dosáhnout větších rozdílů teplot a tím i většího napětí. Většího rozdílu je také možno dosáhnout při menší teplotě okolí (například v zimě při -20°C) nebo za větších povětrnostních podmínek.

## Seznam použité literatury

- [1] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] BENDA, Vítězslav, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje energie*. 1. vyd. Praha: Profipress, 2012, 208 s. ISBN 978-808-6726-489.
- [3] DRÁBOVÁ, Dana a Václav PAČES. *Perspektivy české energetiky: současnost a budoucnost*. Vyd. 1. Praha: Novela bohemia, 2014, 335 s. ISBN 978-80-87683-26-2.
- [4] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Zdroje a využití energie*. 1. vyd. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007, 141 s. ISBN 978-80-213-1647-8.
- [5] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika: elektrická energie ze slunce*. 1. vyd. Praha: EkoWATT, 2009, 93 s. ISBN 978-80-87333-01-3.
- [6] CON BRIO. [online]. [cit. 2014-10-07]. Dostupné z: <http://www.conbrio.cz/Peltieruv%20jev.htm>
- [7] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. [online]. [cit. 2014-10-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [8] HAWLICZEK, Petr. *Využití Peltierových termočlánků jako alternativního zdroje energie* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2014-10-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/87453>. Bakalářská práce. VŠB TU Ostrava. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec.
- [9] BRÁZDIL, Marian. *Peltierovy články pro výrobu elektrické energie*. Brno, 2011. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/1167/2011\\_DP\\_Brazdil\\_Marian\\_53910.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/1167/2011_DP_Brazdil_Marian_53910.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [10] *3POL: Magazín plný pozitivní energie* [online]. [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: <http://3pol.cz/888/print>
- [11] *Konstrukční elektronika a radio*. Praha: Amaro, s.r.o, 2007, XII/2007, č. 3. ISSN 1211-3557.
- [12] Omron. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://industrial.omron.cz/cs/solutions/green-automation/maximising-the-payback-of-your-solar-power-plant>
- [13] Vítej na Zemi...: multimediální ročenka životního prostředí. CENIA, česká informační agentura životního prostředí. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: [http://www.vitejenazemi.cz/vzduch/popup\\_img.php?img=24&system=vzduch](http://www.vitejenazemi.cz/vzduch/popup_img.php?img=24&system=vzduch)

- [14] VEOLIA. *Take the Water2Energy Challenge* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.veoliawater2energy.com/cz/reference/male-vodni-elekt%C3%A1rny/>
- [15] CIRCUIT TODAY. [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/6-to-15v-dc-to-dc-converter>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Základní princip funkce fotoelektrického jevu (1) .....	4
Obr. 2: Fotovoltaické panely (12) .....	5
Obr. 3: Větrné elektrárny (13) .....	7
Obr. 4: Princip vodní elektrárny (14) .....	8
Obr. 5: Thomas Johann Seebeck (vlevo) a Jean Charles Peltier (vpravo) (8) .....	11
Obr. 6: Seebeckův jev (7) .....	12
Obr. 7: Peltierův jev- ohřívání- strana B (7) .....	13
Obr. 8: Peltierův jev- ohřívání- strana A (7) .....	13
Obr. 9: Thomsonův jev (7) .....	14
Obr. 10: Ukázka složení v Peltierově článku (10) .....	15
Obr. 11: Peltierův článek (9) .....	16
Obr. 12: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 1. experimentálního měření .....	22
Obr. 13: Spodní strana s chladičem (obrázek a) a horní strana pro zahřívání (obrázek b) .....	22
Obr. 14: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 2. experimentálního měření .....	23
Obr. 15: 2. experimentální měření .....	23
Obr. 16: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 3. experimentálního měření .....	24
Obr. 17: Blokové schéma napájecího systému .....	25
Obr. 18: Schéma DC/DC měniče .....	26
Obr. 19: Regulátor napětí (11) .....	26
Obr. 20: Experimentální ověření navrhovaného napájecího systému .....	27
Obr. 21: Demonstrace montáže dvou článků na sebe .....	28
Obr. 22: Ukázka experimentu bez vodního chlazení .....	29
Obr. 23: Návrh modelu pro simulaci podmínek na haldách .....	30
Obr. 24: Simulace reálných podmínek .....	31
Obr. 25: Umístění článků s chladiči na profilu zasazeném do šterku .....	32
Obr. 26: Chlazení ventilátory .....	32
Obr. 27: Oddělení chladiče a šterku polystyrenem .....	33
Obr. 28: Přípravek určený pro zasazení do země .....	33
Obr. 29: Aplikace přípravků určených pro zasazení do země .....	34
Obr. 30: Zapojení Arduina a Raspberry PI .....	35
Obr. 31: Zobrazení v programu RexView .....	35
Obr. 32: Konkrétní umístění senzorů DS18B20 .....	36
Obr. 33: Závislost teploty na čase .....	37
Obr. 34: Závislost teploty na čase .....	38
Obr. 35: Závislost rozdílu teplot na napětí na člancích TEC 12710 a TEG .....	39

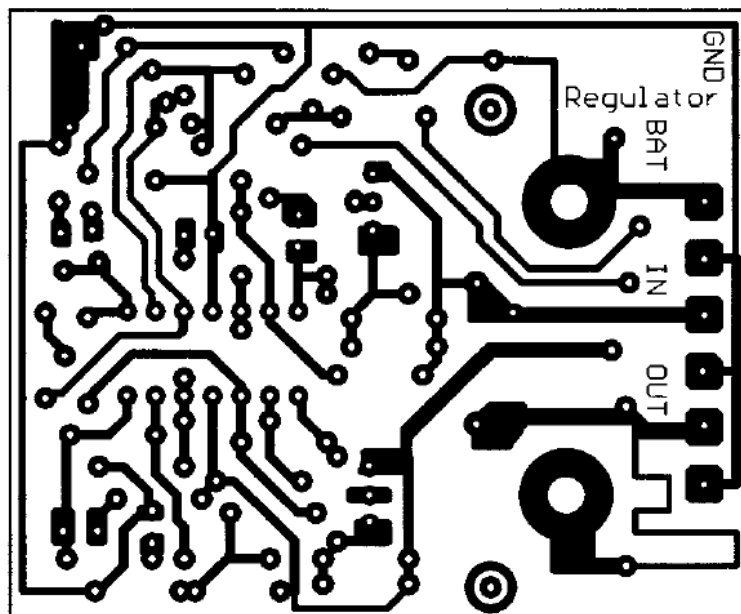
## Seznam tabulek

Tab. 1: Orientační hodnoty množství energie vyrobené malou větrnou elektrárnou v podmínkách České republiky (4 str. 48) .....	6
Tab. 2: Dělení termočlánků podle použitých kovů (8 str. 15).....	17
Tab. 3: Ukázka několika dostupných článků a jejich parametry (9) .....	20
Tab. 4: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 1. experimentálního měření .....	21
Tab. 5: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 2. experimentálního měření .....	23
Tab. 6: Závislost napětí na rozdílu teplot Peltierových článků 3. experimentálního měření .....	24
Tab. 7: Naměřené teploty mimo sud v závislosti na čase .....	36
Tab. 8: Naměřené teploty v sudu v závislosti na čase.....	37
Tab. 9: Tabulka pro zobrazení závislosti rozdílu teplot a napětí na člancích TEC 12710 a TEG .....	38

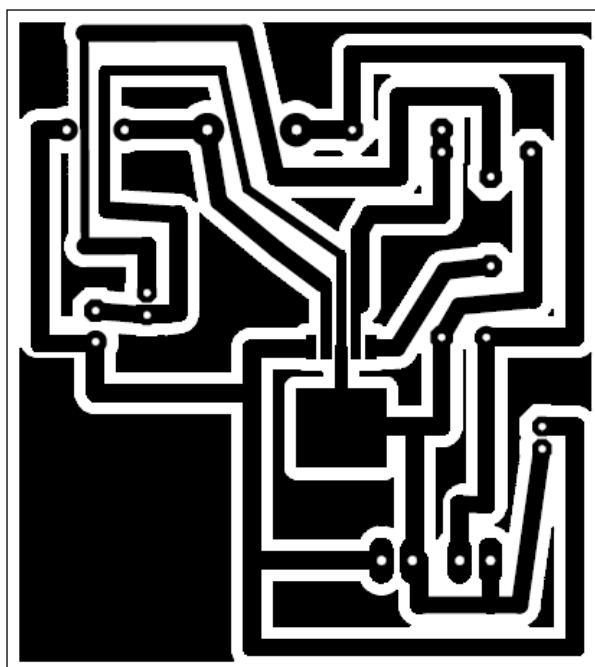


## Přílohy

Obrazce plošných spojů použité v bakalářské práci.



Obr. 1: Obrazec plošných spojů regulátoru napětí



Obr. 2: Obrazec plošných spojů DC/DC měniče

## Seznam příloh na CD

Příloha 1- DC/DC Měnič- Složka: Priloha\_1

- menic.brd
- menic.sch
- menic.pdf

Příloha 2- Amatérské RADIO ročník XII/2007.Číslo 3- Řada B- pro konstruktéry- Priloha\_2.pdf

Příloha 3- Fotodokumentace- Priloha\_3.pdf

Příloha 4- Datasheet LM2585- Priloha\_4.pdf

Příloha 5- Datasheet Fiedler Magr M4016- Priloha\_5.pdf

Příloha 6- Teploty změřené čidly DS18B20 uvnitř sudu- Priloha\_6.csv

Příloha 7- Teploty změřené čidly DS18B20 vně sudu- Priloha\_7.csv

Příloha 8- Teploty všech použitých senzorů DS18B20- Priloha\_8.csv